

Conference Proceedings, Published Version

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.)

Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107031>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.) (2020): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, 63).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik



WASSERBAULICHE MITTEILUNGEN

Heft 63

**Interdisziplinärer Wasserbau
im digitalen Wandel**

Interdisciplinary Hydraulic Engineering
in Times of Digital Transformation

Dresdner Wasserbaukolloquium 2020

GEWÄSSER IN **BEWEGUNG**

Die Prozesse des Wasserbaus erfordern eine ganzheitliche Betrachtung. Wir verstehen die Zusammenhänge, kennen die Abläufe und verfolgen einen interdisziplinären Ansatz – von der strategischen Planung bis zur Realisierung.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen
Heft 63



Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel

Interdisciplinary Hydraulic
Engineering in Times of
Digital Transformation

43. Dresdner
Wasserbaukolloquium 2020
05. – 06. März 2020



**Gesellschaft der Förderer des
Hubert-Engels-Instituts**
für Wasserbau und Technische Hydromechanik
der Technischen Universität Dresden e. V.

Bibliografische Informationen

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie. Die bibliografischen Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen,
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

Dresden: Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, 2020
 (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen; Heft 63)
 Zugl.: Dresden, Techn. Univ., 2020
 ISBN 978-3-86780-627-5

Herausgegeben im Auftrag des Rektors der Technischen Universität Dresden von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stamm
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K.-U. Graw

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Tel.: +49 351 463 34397
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: wasserbau@tu-dresden.de
WWW: <http://www.iwd.tu-dresden.de>

Redaktionsschluss: 16.02.2020

Verlag: Selbstverlag der Technischen Universität Dresden

Grafik Titelseite: Ausschnitt einer virtuellen Stadt mit modelliertem
Hochwasserszenario
(Lars Backhaus, IWD)

Der Nachdruck des Heftes bedarf der Genehmigung durch die Redaktion und ist nur mit Quellenangabe gestattet.

ISSN 0949-5061
ISBN 978-3-86780-627-5

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Jürgen Stamm	

A2	Aktuelle Forschung – Innovative Entwicklungen 1	Saal 2
-----------	--	---------------

Smart Hydraulic Structures - Wohin führt uns der Weg?	3
Holger Schüttrumpf	
Wege zur Digitalisierung im Verkehrswasserbau	11
Christoph Heinzelmann, Jörg Bödefeld, Zorana Duric	
Anwendungen von künstlichen neuronalen Netzen im Wasserbau	21
Mohamad Zounemat-Kermani, Elena Matta, Reinhard Hinkelmann	
Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) für die Optimierung von Planungsprozessen im Wasserbau	31
Patrycja-Jadwiga Sankowska, Nina Kumbruck, Christian Leih, Andreas Niekler, Daniel Wiegrefe	

B2	Komplexe Planung	Saal 1
-----------	-------------------------	---------------

Pumpspeicherwerk Forbach – «Alte Technik» gepaart mit neuen technischen Entwicklungen im Dienste der Energiewende	41
Robert Achatz	
Entwurf und Ausführungsplanung der 265 m hoch Steinschüttdamm mit Betonoberflächendichtung der 835 MW Dudhkoshi Speicherwasserkraftanlage in Nepal	51
Cesar Adolfo Alvarado Ancieta, Mohan Shakya, Shrestha Basanta	
Innerstädtischer Neubau Wehrkomplex Stifftsmühle mit Kanustrecke	63
Gereon Hermens	
Hubbrückenensemble Lübeck – Denkmalschutz und digitale Planungsverfahren	71
Tobias Schaulat, Rüdiger Richter	
Kunststoffe und Umwelt: Neue Herausforderungen für Geokunststoffe	79
Helge Hoyme, Lars Vollmert	

A3	Verkehrswasserbauliche Innovationen	Saal 2
	Digitalisierung im Verkehrswasserbau: Aktuelle Entwicklungen	89
	Daniela Schenk, Charlotte Laursen	
	Wehranlage Viereth, Chancen einer durchgängigen Bearbeitung als BIM-Projekt vom Entwurf bis zur Werkstattplanung	99
	Elmar Wilde, Matthias Schäfers, Norman Braun, Christian Zehnter	
	Das neue Schiffshebewerk Niederfinow als Beitrag zur Baukultur in Deutschland	113
	Rolf Dietrich	
	PREVIEW – Steigerung der Resilienz von Wasserstraßen	123
	Jörg Bödefeld, Francesca Marsili, Jan Akkermann, Simon Weiler	
B3	Ökohydraulik	Saal 1
	Durch prozessgestütztes, digitales Gewässermanagement zur qualitätsgesicherten Maßnahmenumsetzung	133
	Andreas Stowasser	
	Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischauf- und -abstieg durch ein Wasserwirbelkraftwerk	143
	Falko Wagner, Peter Warth, Nadine Müller, Christian Jähnel, Jürgen Stamm	
	Untersuchungen zum ökologischen Abfluss in Gewässern des Himalaya mit moderner Feld- und Modellierungstechnik	159
	Matthias Schneider, Iana Kopecki, Klaus Jorde, Christian Haas, Philipp Thumser	
	Durchgehende 3-D digitale Planung für die höchste Fischaufstiegsanlage in den Niederlanden - Von der Idee bis zur Inbetriebnahme in nur 28 Monaten	169
	Marq Redeker	

A4	3D-Datenerfassung und -analyse	Saal 2
	Zum Einsatzpotenzial des Terrestrischen-Laser-Scanning (TLS) in der wasserbaulichen Praxis	179
	Jens-Uwe Wiesemann, Lukas Priebe, Florian Schill	
	Mobiles Laserscanning zur hochaufgelösten und genauen Erfassung der Uferbereiche des Sabrodtter und des Spreetaler Sees	191
	Robert Blaskow, Danilo Schneider	
	KomVISH & HydroVISH: Möglichkeiten der Verwaltung, Visualisierung und Nutzung von 3D Massendaten aus Vermessung und Modellierung sowie offiziellen Geodaten im digitalen Wasserbau	203
	Frank Steinbacher, Werner Benger, Wolfgang Dobler, Ramona Baran	
B4	Aktuelle Forschung	Saal 1
	FloRiCiMo - Hochwasserrisikoanalyse und -kommunikation auf Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen	215
	Torsten Heyer, Hellen Hammoudi, Rocco Zimmermann, Lars Backhaus, Jürgen Stamm, Arne Schilling, Stefan Trometer	
	Hydrographische Maßnahmen für eine smart-BWaStr	225
	Thomas Artz, Dieter Willersinn	
	Mit Envision® zur nachhaltigen Infrastrukturentwicklung	235
	Nina Kumbruck, Tobias R. Möller	
	Digitale Chancen in der Messtechnik - LowCost-Ansätze für komplexe Messaufgaben am Beispiel des Modelldeichs der TU Dresden	245
	Dirk Fleischer, Vladislave Kostkanová, Ulf Helbig, Götz Tintelnot, Thomas Hohlfeld	

C1	Monitoring	Saal 2
	ZASA – Eine App zur ZustandsAnalyse für StauAnlagen	255
	Antje Bornschein, Reinhard Pohl	
	Multisensorales ingenieurgeodätisches Bauwerks- und -umfeldmonitoring	265
	Herbert Brockmann, Uwe Sörgel, Patrick Havel, Lutz Röpel, Michael Cramer, Philipp Schneider	
	Angepasstes Wasserverlustmonitoring in der intermittierenden Wasserversorgung	275
	Miran Mastaller, Franz Nestmann	
	Datenübertragung mittels Messaging System und Container-technik	285
	Alexander Hartung, Christian Borchardt, Heiko Althoff	
D1	Projekt- und Prozesssteuerung	Saal 1
	Agentenbasierte Logistiksimulation im mobilen Hochwasserschutz	295
	Simon Jegelka, Patrick Kluding, Wilhelm Nüßer	
	Digitale Methoden zur Projekt- und Geodatenverwaltung	305
	Susanne Mehlhorn, Markus Moser, Stefan Janu	
	Einsatz eines digitalen Informationssystems für das kommunale Hochwasserrisikomanagement	313
	Stefan Quoika, Joachim Wald	
	Entwicklung eines Abstautools für das Entscheidungshilfesystem der Stauraumsteuerung an der österreichischen Drau	317
	Oliver Buchholz, Ulrich Haberl, Simon Frey, Maarten Smoorenburg, Bernhard Becker, Simone Patzke, Hendrik Burkamp	

C2	BIM	Saal 2
	BIM-Einsatz bei kleineren Planungsprojekten - geht das nicht zu weit?	329
	Levon Vardanyan, Stephan Heimerl, Beate Kohler	
	BIM in der Deichplanung, Ansätze, Erfolge und Herausforderungen	339
	Ilja Prinz	
	BIM im Bestand für Betrieb und Unterhaltung von Wasserbauwerken – das Projekt ´Neue Schleuse Trier´	345
	Ralf Becker, Sigfrid Knapp	
	BIM Collaboration – Digitale und interdisziplinäre Zusammenarbeit in openBIM Projekten	355
	Sven Oettinghaus	
D2	Hochwasseranalyse und -management	Saal 1
	Von der Richtlinie zur Maßnahmenoptimierung	365
	Gabriel Gönnert, Jan-Moritz Müller	
	Anforderungen an Modelle und Modellierer bei der Aktualisierung und Neuerstellung von Hochwasserkarten	373
	Thomas Kopp, Stephan Gerber, Norbert Prange	
	Robuste Parameterschätzung und eine effiziente Unsicherheitsanalyse in großskaligen hydrologischen Modellanwendungen	383
	Marlene Gelleszun, Phillip Kreye, Günter Meon	
	Hochwasserrückhaltung Öberauer Schleife	393
	Anke Ezzeddine, Mohamad Sadaghiani, David Biebach, Rudolf Schneider	

C3	HN-Modellierung	Saal 2
	Wiederherstellung der Hochwassersicherheit der Talsperre Lehmühle - physikalische und 3D-numerische Modellierung	403
	Tilo Buschmann, Carsten Cherubim, Michael Humbsch, Hubertus Milke, Tilo Sahlbach	
	3-D-FE-Modellierung für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern - Herausforderungen und Lösungen am Beispiel der Okertalsperre	413
	Kristina Aldermann, Uwe Beetz, Chrstian Bellak	
	Hydraulische sowie 1D und 3D numerische Modellierung einer Flutwelle in einer Schlucht	423
	Andrea-Kristin Bachmann, Jürg Speerli, Walter Clausen	
	Hydro-numerische Simulationen vs. Einschätzung – Instrumente zur Gefahrenbeurteilung in Wildbächen	433
	Markus Moser, Susanne Mehlhorn, Stefan Janu, Gerald Jäger, Johannes Kammerlander,	
D3	Komplexe Planung	Saal 1
	Komplexbaustelle Hochwasserrückhaltebecken (HRB) Wippra	443
	Lars Schaarschmidt, Andreas Rudolf, Sigrid Schulmann	
	Staudamm Roßhaupten - Nutzung des digital Twins in der Ausführung	453
	Marcus Daubner, Torsten Henßler	
	Bewertung und Vergleich von Lösungen im modernen Hafenbau	461
	Oliver Hechler, Oliver Gregor, Ernst Weber	
	Schalltechnische Untersuchungen des Baustellenlärms bei wasserbaulichen Maßnahmen	473
	Alexander Colloseus	
	Förderverein	
	Übersicht der Hefte „Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen“	483

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Kolleginnen und Kollegen,

die Digitalisierung schreitet unaufhaltsam voran und führt gerade in den Ingenieurdisziplinen zu tiefgreifenden Änderungen aber auch zu innovativen Entwicklungen bei Verfahren, Technologien, Strukturen sowie Arbeitsprozessen. Neue Chancen und Möglichkeiten eröffnen sich nicht nur bei Entwicklern und Anwendern, sondern in nahezu allen Berufs- und Tätigkeitsfeldern des Planungs- und Bauwesens. Der Begriff „Bauen 4.0“ versteht sich als Idee einer geschlossenen, digitalen Kette, die sämtliche Schritte im Bau miteinander verknüpft. Der damit verbundene Prozess wird zügig aus den Entwicklungslaboren die Praxis erfassen und im technologischen Tempo auf vielfältige Weise auch im Wasserbau Einfluss nehmen. Dies ist zugleich als Herausforderung und Chance für die Berücksichtigung der zunehmend interdisziplinären und partizipativen Anforderungen in unserer Fachwelt zu betrachten.

Das Motto des Dresdner Wasserbaukolloquiums 2020 bietet für alle wasserbaulichen Teildisziplinen ein Forum zur Projektvorstellung und Diskussion in den Bereichen Planung, Bau, Betrieb, Instandhaltung und Rückbau, insbesondere unter dem Blickwinkel des digitalen Wandels und der Interdisziplinarität. Exemplarisch dafür stehen komplexe Planungsverfahren unter Beteiligung zahlreicher Akteure, prozessgeleitete strukturierte Planungs- und Bauverfahren, automatisierte Monitoringverfahren, Predictive-Maintenance-Strategien, Building-Information-Modeling, hydronumerische Simulationen von Strömungs- und Transportprozessen, Habitatmodellierungen, smarte Bauwerke u. v. a. m.

Das diesjährige Dresdner Wasserbaukolloquium soll seinen Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein Podium bieten, sich über den aktuellen Stand der Forschung, die anwender- und technologieorientierten Entwicklungen sowie über digitalisierte Prozesse und Partizipationsverfahren zu informieren und auszutauschen. Die Veranstaltung wird wieder von zahlreichen engagierten Vortragenden und der in diesem Jahr erweiterten, begleitenden Fachausstellung getragen.

Das 43. Dresdner Wasserbaukolloquium folgt so seiner langjährigen Tradition, sich als vernetzendes Format zwischen Wissenschaft, Industrie, Administration und Praxis zu verstehen. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine spannende Veranstaltung, einen intensiven sowie fruchtbaren fachlichen Austausch zum Leitthema „Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel“ und selbstverständlich einen angenehmen Aufenthalt in unseren schönen Landeshauptstadt Dresden.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Stamm', with a stylized initial 'J' and a long, flowing surname.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Smart Hydraulic Structures - Wohin führt uns der Weg?

Holger Schüttrumpf

Die Digitalisierung hat alle Bereiche unseres täglichen Lebens, Arbeitens und Wohnens erfasst. Wasserbauwerke werden zwar auch mit Sensoren und Messtechnik ausgestattet, doch gibt es hier noch gewaltige Potentiale, die bislang noch nicht genutzt werden. Ziel ist es, das Monitoring von Wasserbauwerken sowohl unter Normalsituationen als auch unter extremen Belastungssituationen zu verbessern, um damit Kosten zu reduzieren, Schäden zu vermeiden, die Lebensdauer von Wasserbauwerken zu erhöhen und die Widerstandsfähigkeit im Extremfall zu verbessern.

Stichworte: Digitalisierung; Smart Civil Structures, Sensorik, Wasserwirtschaft 4.0

1 Einleitung

Ein sensorbasiertes Monitoring von Prozessen und Zuständen ist in vielen Bereichen unseres Lebens eine Normalität. In jedem Auto sind viele Sensoren implementiert, die z.B. Fahrgeschwindigkeit, Drehzahl, Ölstand, Luftdruck und viele andere Parameter kontinuierlich erfassen und bei Bedarf sogar aufzeichnen. Moderne Kaffeemaschinen erkennen den Füllstand im Kaffeebohnenbehälter und im Wasserbehälter. Kühlschränke erkennen Temperaturen und Inhalt. Smartwatches und Fitnesstracker zeichnen unseren Puls, unsere Aktivitäten und sogar unsere Position auf und werten die gewonnenen Daten statistisch aus. Die Kosten für diese Geräte liegen zwischen rd. 100 Euro (Kaffeemaschine), 200 Euro (Fitnesstracker), 500 Euro (Kühlschrank) und 30.000 Euro (Mittelklassewagen). Das Risiko im Falle eines Versagens oder Ausfalls der beobachteten Prozesse ist in vielen der erwähnten Bereiche gering (kein Kaffee, zu warmer Kühlschrank, keine Weiterfahrt mehr möglich).

Anders sieht dies bei Ingenieurbauwerken wie Staudämmen, Brücken, Straßen, Türmen, Tunneln und anderen Hoch- und Tiefbauwerken aus. Ein Versagen des Bauwerks kann u.U. viele Menschenleben gefährden und zu einem erheblichen ökonomischen Schaden führen. Beispielsweise werden durch die Deiche am Niederrhein rd. 1,5 Mio. Menschen und 150 Mrd. Euro an ökonomischen Werten geschützt.

Interessanterweise finden sich in den erwähnten Ingenieurbauwerken keine oder nur wenige Sensoren, um die Funktionalität, Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit von Bauteilen oder des gesamten Bauwerks zu beobachten und frühzeitig Informationen bzgl. einer Gefährdung oder Veränderung im System an den Betreiber zu schicken.

Die zentrale Frage ist somit, wieso nutzen wir Sensoren im täglichen Leben und setzen nur wenige Sensoren zur Überwachung sicherheitsrelevanter Bauwerke ein. Zu unterscheiden sind in diesem Zusammenhang Sensoren, die die Stabilität eines Bauwerks überwachen, und Sensoren, die dessen Funktionalität überwachen.

Insbesondere stellt sich diese Frage auch im Wasserbau, wenn es das Monitoring von Wasserbauwerken (Deiche, Dämme, Hochwasserschutzmauern, Wehre, etc.) betrifft. Insbesondere die Hochwasserschutzbauwerke sollen extremen Belastungen standhalten und entsprechend widerstandsfähig sein.

Der folgende Kurzbeitrag wird sich mit dieser Frage beschäftigen und die Vor- und Nachteile smarter Wasserbauwerke diskutieren. Erfahrungen aus dem BMBF-Projekt „Earlydike“ werden genutzt, um die Möglichkeiten und Potentiale von Sensoren am Beispiel von Deichen zu diskutieren.

Das Projekt Earlydike erweiterte hierbei Erkenntnisse des BMBF-Projekts “Sensorbasierte Geotextilien” (FKZ: 02WH0570 bis 02WH0574) und des EU UrbanFlood-Projekts, die optische Sensoren nutzen.

2 Das BMBF-Projekt Earlydike

2.1 Einleitung

Ziel des BMBF-Projekts Earlydike war die Verbesserung von Frühwarnsystemen im Hochwasserfall durch Sensoren in Deichen. Herkömmliche Frühwarnsysteme basieren auf der Beobachtung von Wasserständen unter Berücksichtigung numerischer Modellverfahren für die Wasserstandsprog-

nose. Hiermit können Wasserstände mit hoher Genauigkeit aufgezeichnet und vorausberechnet werden.

In verfügbaren Frühwarnsystemen and Hochwasserschutzdeichen wird das Bauwerk Deich selber nicht mitberücksichtigt. Dies bedeutet, dass dem Hochwasserschutzverantwortlichen während des Hochwasserfalls keine Informationen über den Zustand des Deiches selber vorliegen. Er hat keine Informationen über Sickerlinien, Wassergehalte, Festigkeitsänderungen, Verformungen oder sonstige Veränderungen im Deichkörper selber.

Üblicherweise wird diesem Manko durch Deichläufer begegnet, die im Hochwasserfall am Deich entlangfahren, um den Zustand des Deiches zu überwachen und ggf. Veränderungen zu identifizieren. Die Funktion des Deichläufers kann hier auch durch Drohnen, Hubschrauber oder Flugzeuge übernommen werden. Problematisch bei dieser Art des Deichmonitorings im Hochwasserfall sind folgende Aspekte:

- ◁ Es kann nur die Dechoberfläche beobachtet werden, d.h. Veränderungen im Deichkörper können u.U. nicht erkannt werden.
- ◁ Veränderungen im und am Deichkörper müssen vom Beobachter identifiziert werden können, d.h. insbesondere kleine Veränderungen bleiben dem menschlichen Auge u.U. verborgen.
- ◁ Die Identifikation von Veränderungen ist von der Erfahrung des Deichläufers abhängig.
- ◁ Der Deichläufer kann nicht an jeder Stelle zu jeder Zeit sein, d.h. es entstehen zeitliche und räumliche Lücken in der Beobachtung.
- ◁ Die Wirkung von Deichstabilisierungsmaßnahmen kann nur optisch beurteilt werden.

Hier bieten sich verschiedene Sensorsysteme in Ergänzung zum traditionellen Deichläufer an, um insbesondere die Nachteile des traditionellen Deichläufers mit den Vorteilen eines innovativen Deichmonitorings zu kombinieren:

- ◁ Informationen zu Veränderungen von Prozessen im Deich (z.B. Wasserstand, Verformung)
- ◁ Kleine Veränderungen können u.U. erkannt werden, damit können Gegenmaßnahmen geplant und realisiert werden.
- ◁ Der Deich kann zeitgleich über seine ganze Länge beobachtet werden und es treten lediglich zeitliche und räumliche Lücken auf, die von der Auflösung der Sensorsysteme abhängen.

- ◁ Deichverteidigungsmaßnahmen können zielgerichtet und passgenau geplant und realisiert werden.

Sensorsysteme in Deichen befinden sich derzeit noch in den Anfängen und es existieren derzeit noch keine Systeme, die in großem Umfang in der Praxis umgesetzt werden könnten. Dennoch befinden sich diese Systeme in Entwicklung und es ist mit einer zunehmenden Digitalisierung von Hochwasserschutzdeichen in Zukunft zu rechnen. Gründe, die derzeit gegen entsprechende Systeme sprechen, ergeben sich aus den Nachteilen von Sensorsystemen:

- ◁ Die Systeme befinden sich noch in der Entwicklung. Bislang existieren nur experimentelle Anwendungen im Labormaßstab.
- ◁ Es fehlt der Nachweis der Praxistauglichkeit im Hochwasserfall. Aufgrund der Seltenheit extremer Hochwasserereignisse ist der Nachweis der Praxistauglichkeit für extreme Hochwasserereignisse nur schwierig zu führen.
- ◁ Die Systeme sind noch nicht ausreichend robust und der Nachweis der Langlebigkeit inkl. der dauerhaften Funktionsfähigkeit ist noch zu führen.
- ◁ Insbesondere aus der geforderten Langlebigkeit der Systeme ergibt sich die Frage, ob Daten auch bei sich verändernden IT-Systemen in Zukunft noch verarbeitet und genutzt werden können.
- ◁ Hochwasserschutz basiert auf bewährten und etablierten Verfahren.
- ◁ Datenschutzprobleme werden häufig erwähnt, wenn es um die Realisierung dieser Systeme geht.

Im Rahmen des BMBF-Earlydike Projekts war es das Ziel, ein Frühwarnsystem auf der Grundlage eines innovativen Deichmonitorings zu entwickeln.

2.2 Das Earlydike-Frühwarnsystem

Ziel des BMBF-Projekts Earlydike war der „Aufbau eines Sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Hochwasserschutzanlagen am Beispiel von Seedeichen unter Berücksichtigung aller relevanten Prozesse“ (Krebs et al., 2017; Schüttrumpf et al., 2017). Abb. 1 zeigt einen Überblick des Systems, inkl. der verschiedenen Komponenten sowie Projektpartner der Universitäten Aachen, Hamburg, Siegen und der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg.

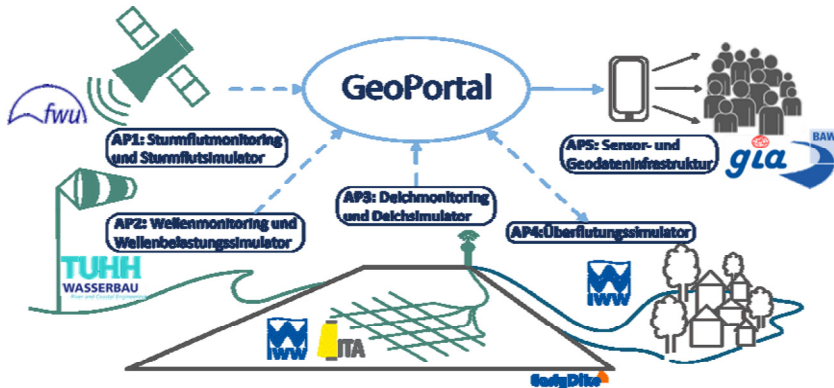


Abbildung 1: Aufbau des Earlydike-Frühwarnsystems (Schüttertrumpf et al, 2017)

Grundlage jedes Frühwarnsystems ist die Beobachtung von Wasserständen. Hierzu wurde vom Institut für Wasserbau der Universität Siegen ein Sturmflutsimulator entwickelt (AP1) (Niehüser et al., 2018), der beobachtete Wasserstände an Pegelstandorten unter Berücksichtigung numerischer Modellverfahren für jeden Punkt entlang der Küste berechnet und interpoliert und um eine Prognose der zu erwartenden Wasserstandsentwicklung ergänzt.

Dieser sogenannte Sturmflutsimulator wurde vom Institut für Wasserbau der TU Hamburg um einen Wellenbelastungssimulator (AP2) zur Erfassung der dynamischen Belastung von Deichen ergänzt und erweitert (Dreier und Fröhle, 2018). Ziel war es, entlang der Küste auch die vollständigen Informationen zur Seegangsbelastung der Deiche im Sturmflutfall zu ermitteln.

Den Kern des Projekts stellte das Arbeitspaket 3 dar, d.h. das Deichmonitoring und der Deichsimulator. In Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen und dem Institut für Wasserbau der RWTH Aachen wurde hier ein geotextilbasiertes Sensorsystem auf der Grundlage von Carbonrovings entwickelt (Quadflieg et al., 2015, Schwab, 2018) und in verschiedenen Modellen in unterschiedlichen Maßstäben erfolgreich getestet (Krebs et al., 2017).

Ergänzt wurde das Deichmonitoring um einen Überflutungssimulator auf der Grundlage von Promaides, um auch die Auswirkungen und damit die Konsequenzen eines Deichversagens bereits im Frühwarnsystem zu berücksichtigen (AP4).

Die Daten des Sturmflutsimulators, des Wellenbelastungssimulators, des Deichsimulators und des Überflutungssimulators werden georeferenziert in Echtzeit an ein Geoportal (AP5) übergeben, das in Zusammenarbeit vom Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme sowie der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg entwickelt wurde (Becker et al., 2018). Dieses Geoportal beinhaltet eine Sensorebene, eine Integrations-ebene sowie eine Präsentationsebene, um insbesondere über letztere den Deichverantwortlichen eine Möglichkeit zur visuellen Erfassung des Deichzustands inkl. der Deichbelastung entlang der Küste zu geben. Genauere Informationen können dann für einzelne Punkte über das System abgerufen werden.



Abbildung 2: Modelldeich: links: Carbonrovings auf Geotextil vor Einbau einer Deckschicht; rechts: Modelldeich mit Deckschicht bei Überströmung

3 Zukunft der Digitalisierung im Wasserbau

Die Digitalisierung bietet auch für den Wasserbau eine Vielzahl von Möglichkeiten. Viele Entwicklungen in Hinblick auf eine Digitalisierung bzw. ein Wasserbau 4.0 haben hier bereits angefangen. Beispiele hierfür sind auch die Entwicklungen im Bereich Building Information Modelling (BIM). Eine wichtige Rolle im Rahmen des Wasserbau 4.0-Ansatzes spielen die Modellierung und die Simulation komplexer und nicht-linearer Prozesse, woraus sich eine Vielzahl von Frühwarn-, Überwachungs-, Steuerungs- und Optimierungssystemen ergeben. Die resultierenden Ergebnisse können visualisiert und somit zur schnellen und direkten digitalen Kommunikation an Stakeholder, die interessierte bzw. betroffene Öffentlichkeit und sonstige Nutzer der Daten verwendet werden. Hieraus ergeben sich zahlreiche Potentiale für den Wasserbau und die Wasserwirtschaft, die derzeit noch wenig genutzt werden und von den verschiedenen Akteuren im Wasserbau eine stärkere Digitalisierung erfordern.

4 Literatur

- Becker, R.; Herle, S.; Blankenbach, J. (2018): Interoperable Sensor- und Dateninfrastruktur für das Echtzeitmonitoring von Wasserbauwerken. – In: D3 - Deckwerke, Deiche und Dämme: 48. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2018; 18. und 19. Januar 2018.
- Dreier, N.; Fröhle, P. (2018): Now- and Forecast of Waves and Wave Run-up on Coastal Dikes as Part of an Operational Early Warning System for the German North Sea Coast. Proc. of 9th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, Tainan, Taiwan R.O.C., November 11-17, 2018.
- Krebs V, Herle S, Schwab M, Quadflieg T, Gries T, Blankenbach J, Schüttrumpf H (2017) Implementation of sensor-based dike monitoring by smart geotextiles. SCACR2017, International Short Course on Applied Coastal Research in Santander, Spanien vom 03.10. – 06.10.2017
- Krebs, V.; Quadflieg, T.; Grimm, C.; Schwab, M.; Schüttrumpf, H.: Development of sensor-based dike monitoring system for coastal dikes. - In: Proceedings of the 35th Conference on Coastal Engineering, Antalya, Turkey, November 17 to November 20, 2016 / Ed. by P. Lynett; New York, N.Y.: ICCE, 2017; S./Art.: 1-14; ISBN 978-0-9896611-3-3 <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/8271/pdf>

- Niehüser, S., Arns, A., Dangendorf, S., Jensen, J. (2018): A high resolution storm surge forecast for the German Bight, In: Proceedings of the 9th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CG JOINT 2018) in Tainan, Taiwan, November 11 to November 17, 2018.
- Quadflieg, T. ; Schwab, M. ; Gries, T. ; Schüttrumpf, H. ; Jensen, J. ; Fröhle, P. ; Lehfeldt, R. ; Blankenbach, J. (2015): Intelligente Vliesstoffe für den Hochwasserschutz. – In: Melliand-Textilberichte 58(5), S./Art 303-304
- Schüttrumpf, H.; Krebs, V.; Gries, T.; Schwab, M.; Quadflieg, T.: Innovative Frühwarnsysteme zur Überwachung von Deichen. - In: Wasser und Abfall, Vol. 19 (2017), Issue 9, S./Art.: 44-46; Wiesbaden: Vieweg; ISSN 1436-9095
- Schwab, M.: Carbon fiber technology for structural health monitoring of sea dike structures. - In: AZL Aachen GmbH (Hrsg.): NewsLight #12 / ITA. - Aachen: AZL GmbH, 2018, <https://azl-aachen-gmbh.de/de/newslight-12-ita/> (Internetveröffentlichung)

Autor:

Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
52074 Aachen

Tel.: +49 241 80 25262
Fax: +49 241 80 25750
E-Mail: schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de

Wege zur Digitalisierung im Verkehrswasserbau

Christoph Heinzelmann
Jörg Bödefeld
Zorana Duric

Die Digitalisierung im Verkehrswasserbau bietet einerseits große Chancen und ist andererseits eine große Herausforderung für die nächsten Jahre. Um das Effizienzpotenzial der Digitalisierung voll auszuschöpfen, muss der gesamte Lebenszyklus der Bauwerke vom Planen und Bauen bis zum Betreiben und Unterhalten betrachtet werden. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich Perspektiven, die weit über die Bauwerksplanung und die intelligente Bauwerksmodellierung hinausgehen. Der vorliegende Beitrag präsentiert mögliche Wege für eine erfolgreiche Digitalisierung im Verkehrswasserbau und zeigt auf, welche konkreten Schritte bereits heute unternommen werden können, um eine stabile Basis für eine nachhaltige digitale Entwicklung zu schaffen.

Stichworte: Wasserstraßen, Digitalisierung, Lebenszyklus, Prozesse, Daten, nutzerorientierte Informationsversorgung

1 Politische Rahmenbedingungen

In der Vergangenheit sind vermehrt Konflikte bei der Abwicklung von großen Infrastrukturprojekten aufgetreten. Die Folge waren große Abweichungen zwischen den veranschlagten und den abgerechneten Kosten sowie eklatante Überschreitungen des ursprünglich vorgesehenen Terminrahmens. Darunter hat das Vertrauen der Gesellschaft gegenüber den Projektbeteiligten (öffentlicher Bauherr, Genehmigungsbehörde, Ingenieurbüros, Bauindustrie) stark gelitten. Um die Ursachen für diese Fehlentwicklungen zu analysieren und geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen, hat das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im

Jahr 2013 eine Reformkommission eingesetzt, deren Aufgabe es war, die Defizite zu untersuchen und Lösungsvorschläge zu erarbeiten.

Im Abschlussbericht der Reformkommission des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) wurde als Hauptursache für die Fehlentwicklungen ein unzureichendes Kommunikations- und Informationsmanagement genannt. Die Reformkommission empfahl daher, digitale Methoden im gesamten Projektverlauf konsequent zu nutzen, da sie entscheidend zu Kostenwahrheit, Kostentransparenz, Effizienz und Termintreue beitragen können (BMVI (2015a)).

Aufbauend auf den Ergebnissen der Reformkommission hat das BMVI im Jahr 2015 den Stufenplan Digitales Planen und Bauen veröffentlicht (BMVI (2015b)), für dessen Umsetzung ein ambitionierter Zeitplan vorgesehen ist. Seitdem arbeiten die Infrastrukturbetreiber daran, die im Stufenplan lediglich grob skizzierten Stufen für ihre Aufgabenbereiche zu konkretisieren und nach und nach umzusetzen. Als digitale Methode wird im Stufenplan die Methode Building Information Modeling (BIM) vorgegeben. Der Kern von BIM ist ein dreidimensionales Bauwerksmodell mit Bauteilen, die alle relevanten Informationen enthalten (BMVI (2015b), Borrmann et al. (2015)). Ziel ist es, ein virtuelles Abbild der Realität in Form eines digitalen Zwillings zu erschaffen, der sämtliche Informationen über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks aktuell und redundanzfrei vorhält.

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat für ihren Aufgabenbereich das Potenzial der Digitalisierung erkannt und für die stufenweise Implementierung der BIM-Methode zwei Pilotprojekte initiiert: den Ersatzneubau der Westkammer der Schleuse Wedtlenstedt und den Neubau der Schleuse Lüneburg. Für das Pilotprojekt Schleuse Wedtlenstedt wurden fünf Anwendungsfälle aus der Planungsphase, z. B. Bestandserfassung und Koordination der Fachgewerke, gewählt. Die Schleuse Lüneburg soll komplett mittels BIM mit einer großen Anzahl von Anwendungsfällen geplant werden. Im Rahmen eines Ziel- und Zukunftskonzepts BIM-WSV 2030 hat die WSV darüber hinaus Projekte ausgewählt, mit denen weitere Anwendungsfälle, insbesondere in der Bau- und Abrechnungsphase, erprobt werden sollen. Allerdings zeigen die bisherigen Projektbearbeitungen, dass die Implementierung der BIM-Methode in der WSV ein langfristiger Prozess sein wird. Dies ist maßgeblich darauf zurückzuführen, dass aufgrund der langen Projektlaufzeiten erst nach und nach erste Erfahrungen aus den Pilotanwendungen vorliegen werden.

Auch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hat die Digitalisierung im Verkehrswasserbau als wichtige Zukunftsaufgabe aufgegriffen. In ihrer Funktion als der technisch-wissenschaftliche Berater und Gutachter für die WSV entwickelt die BAW einen umfassenden Digitalisierungsansatz, der über das digitale Bauwerksmodell hinausgeht. Nachfolgend werden zunächst die Ausgangssituation der Digitalisierung in der WSV und anschließend der Digitalisierungsansatz der BAW sowie die daraus resultierenden Handlungsempfehlungen beschrieben.

2 Status Quo der Digitalisierung in der WSV

Die WSV setzt bereits heute an vielen Stellen moderne und standardisierte bzw. verbindlich eingeführte IT-Systeme für Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken ein. Die IT-Landschaft der WSV ist in den letzten Dekaden stark gewachsen. Insgesamt existieren über 100 aktive IT-Systeme, von denen etwa 40 für die Prozesse in den Phasen Planen, Bauen und Betreiben relevant sind (Schenk und Laursen (2020)). Da die Systeme oft singulär und unabhängig voneinander über Jahre aufgebaut, immer wieder erweitert und dem jeweiligen Bedarf angepasst wurden, ist ein Mosaik zahlreicher Anwendungen und Datenbanken mit technologischer Heterogenität und redundanten Daten in unterschiedlicher Qualität entstanden.

Die Herausforderung im Zuge der weiteren Digitalisierung besteht darin, die vorhandenen IT-Systeme zu vernetzen, um redundante Daten zu vermeiden, die Datenqualität zu verbessern und die Daten auch außerhalb der originären IT-Systeme nutzbar zu machen. Im Beitrag „Digitalisierung im Verkehrswasserbau: Aktuelle Entwicklungen“ im vorliegenden Tagungsband werden das Potenzial der Vernetzung von Daten aus den verschiedenen IT-Systemen mit dem Ziel einer optimierten nutzerorientierten Informationsversorgung betrachtet und konkrete Lösungen präsentiert (Schenk und Laursen (2020)).

3 Handlungsfelder der Digitalisierung

Der von der BAW verfolgte Digitalisierungsansatz setzt sich aus den folgenden vier Handlungsfeldern zusammen: Prozesse, Daten, Menschen und Grundlagen (Abbildung 1). Nachfolgend werden die einzelnen Handlungsfelder beschrieben und die zugehörigen Ziele erläutert.

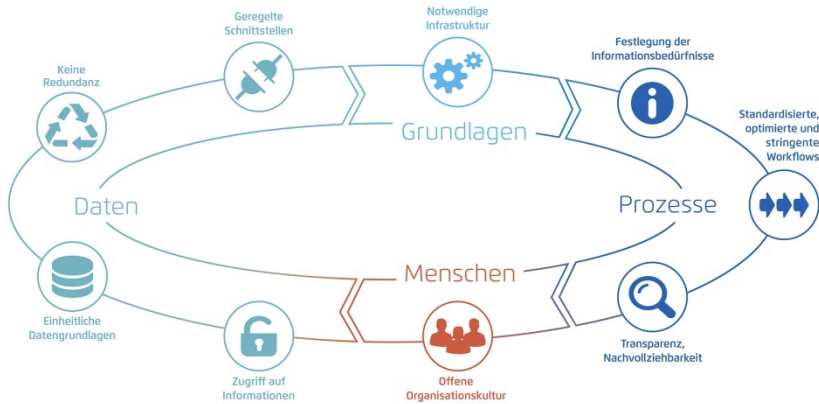


Abbildung 1: Schematische Darstellung der vier Handlungsfelder (Prozesse, Daten, Menschen und Grundlagen)

3.1 Prozesse

Um die Informationsbedürfnisse der in einem Bauprojekt Beteiligten identifizieren zu können, müssen die Prozesse bekannt und eindeutig beschrieben sein. Ein Prozess ist „ein Satz zusammenhängender (...) Tätigkeiten, der Eingaben zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses verwendet“ (DIN EN ISO 9000:2015-11). Einzelne Prozesse, die in den verschiedenen Lebensphasen eines Bauwerks vorkommen, z. B. die Erstellung einer Voruntersuchung zu Projektbeginn, sind bereits durch Verwaltungsvorschriften und andere Regelwerke dokumentiert. Jedoch ist häufig eine weitere Konkretisierung erforderlich, was z. B. den Umfang, die Art der Unterlagen und explizite Entscheidungsmomente betrifft. Eine systematische Untersuchung der entsprechenden Prozesse ermöglicht, neben der Abfolge der Aktivitäten und den beteiligten Rollen, die Entscheidungsmomente und die dafür benötigten Informationen zu ermitteln.

Vorrangiges Ziel im Handlungsfeld Prozesse ist es, die Prozesse und IT-Systeme zu standardisieren. Die Standardisierung der Prozesse sowie deren Implementierung in die bestehende IT-Landschaft bieten die Chance, eine höhere Prozesstransparenz und -struktur zu schaffen, mit der auch eine Optimierung der Prozessleistung einhergeht. Des Weiteren kann der Koordinationsaufwand gesenkt und die Leistungseffizienz gesteigert werden. Die Voraussetzung ist eine verbindliche Nutzung der standardisierten Prozesse und IT-Systeme.

3.2 Daten

Voraussetzung für die bedarfsorientierte Bereitstellung der Informationen ist ein einheitliches Informationsmodell. Dieses Modell beinhaltet strukturierte und qualitativ hochwertige Daten für einen effektiven Zugriff und eine einheitliche Datengrundlage. Da bereits heute zahlreiche Daten in verschiedenen IT-Systemen digital vorliegen, ist es aus Akzeptanz- und Ressourcengründen sinnvoll, diese Systeme zu nutzen und in das Informationsmodell zu integrieren. Dies erfordert, dass die Daten aus den verschiedenen IT-Systemen miteinander vernetzt werden. Voraussetzung dafür ist neben der Datenharmonisierung und -bereinigung auch die Regelung der Schnittstellen zum Datenimport und -export zwischen den IT-Systemen.

Ziel im Handlungsfeld Daten ist es, qualitätsgesicherte und strukturierte Daten zu schaffen. Die Qualität bezieht sich dabei u. a. auf die Richtigkeit und Vollständigkeit, die Verständlichkeit sowie die Aktualität der Daten. Eine einheitliche strukturierte Ablage gewährleistet in Kombination mit einer zeitgemäßen IT eine bessere Zugänglichkeit bzw. schnelle Auffindbarkeit, was ein weiteres Qualitätsmerkmal von Daten ist. Werden die Daten im Rahmen von Prozessen genutzt, erfolgt die Pflege automatisch. Eine manuelle Nachpflege entfällt.

3.3 Menschen

Bei allen Schritten, die im Zuge der Digitalisierung gegangen werden, ist die Beteiligung und Mitnahme der betroffenen Menschen von entscheidender Bedeutung. Dies reicht von der Information der Beteiligten über Möglichkeiten des Erfahrungsaustausches bis hin zur Förderung neuer Ideen und Initiativen.

Ziel im Handlungsfeld Menschen ist es, die betroffenen Menschen frühzeitig in den Veränderungsprozess einzubinden, sie durch eine offene Organisationskultur für die Anwendung digitaler Werkzeuge zu motivieren und zu qualifizieren.

3.4 Grundlagen

Ziel im Handlungsfeld Grundlagen ist die Bereitstellung einer leistungsfähigen und zeitgemäßen IT-Infrastruktur. Dazu zählen eine zuverlässige Hard- und Software sowie eine stabile und leistungsfähige Netzwerkanbindung.

4 Handlungsempfehlungen für die Digitalisierung

Für die Erreichung der für die einzelnen Handlungsfelder formulierten Ziele werden die nachfolgenden Handlungsempfehlungen gegeben (Tabelle 1). Die möglichen Maßnahmen reichen von konkreten, schnell umzusetzenden Schritten bis hin zu Entwicklungen, die jetzt anzustoßen sind und eine längere Perspektive aufweisen.

Die Digitalisierung betrifft alle Bereiche einer Organisationseinheit und einer Wertschöpfungskette. Die Handlungsfelder Prozesse, Daten, Menschen und Grundlagen müssen gleichermaßen in den digitalen Transformationsprozess einbezogen werden. Besonders in großen Organisationen ist diese digitale Veränderung komplex und verlangt ein visionäres und strategisches Handeln. Der digitale Wandel für den Verkehrswasserbau sollte daher fachübergreifend gesteuert werden. Daher wird empfohlen, eine eng an die Organisationsführung angebundene Digitalisierungskoordination zu gründen.

Tabelle 1: Handlungsempfehlungen

Handlungsfeld	Handlungsempfehlungen
Prozesse	Detaillierte Analyse einzelner Prozesse
Daten	Umsetzung der Optimierungspotenziale aus der Bestandserfassung der IT-Landschaft: <ul style="list-style-type: none"> ◁ Einführung einer verbindliche Nutzung der IT-Systeme ◁ Vereinheitlichung von Bauteilstrukturen ◁ Optimierung des digitalen Baubestandwerks ◁ Aufbau einer Preisdatenbank ◁ Modernisierung und Optimierung des Objektkatasters ◁ Aufbau eines zentralen Projektinformationssystems
Menschen	Bereitstellung digitaler Werkzeuge für Kommunikation, Einrichtung eines Innovation Labs
Grundlagen	Bereitstellung von technischen Standardwerkzeugen für alle Dienststellen (z. B. flächendeckender Netzwerkzugang, digitale Kommunikationswerkzeuge)
Alle	Etablierung einer eng an die Organisationsführung angeordneten Digitalisierungskoordination

4.1 Prozesse

Das Handlungsfeld Prozesse erfordert eine detaillierte Analyse der Prozesse, was zunächst für kleinere Bauprojekte erprobt werden sollte. Mögliche Beispiele für die zu analysierenden Prozesse sind: die Erstellung einer Voruntersuchung, die Aufstellung von Entwurfsunterlagen für die Haushaltsanmeldung sowie die Übergabe der Bestandsunterlagen an die für den Betrieb verantwortlichen Stellen. Im Rahmen von Workshops oder Befragungen mit Projektbeteiligten lassen sich die Abhängigkeiten und die Aktivitäten des betrachteten Prozesses identifizieren. Darüber hinaus sind relevante Informationen aus Projektunterlagen und Regelwerken zu berücksichtigen. Eine Visualisierung der Ergebnisse in Form von Ablaufdiagrammen, wie beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt, sichert die eindeutige Beschreibung der Prozesse. Ein Vergleich der Ergebnisse aus verschiedenen Projekten und eine Vereinheitlichung sowie perspektivisch eine Standardisierung der Prozesse können in einem Folgeschritt stattfinden. Durch ein kontinuierliches Anwender-Feedback wird die Möglichkeit gegeben, die Prozesse schrittweise zu verbessern.

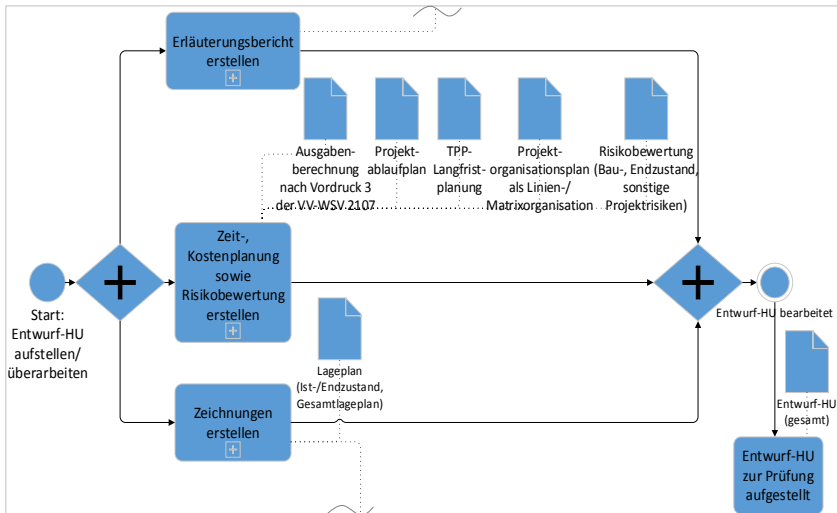


Abbildung 2: Auszug aus dem Prozessdiagramm für den Entwurf-HU (Rolle: Projektleitung)

4.2 Daten

Für das Handlungsfeld Daten sind die im Rahmen der Bestandserfassung der IT-Systeme identifizierten Optimierungspotenziale umzusetzen (Schenk und Laursen (2020)). Dazu zählen z. B. die Realisierung einer verbindlichen Nutzung von eingeführten IT-Systemen, die Implementierung einer einheitlichen Bauteilstruktur in den IT-Verfahren und die Optimierung des digitalen Baubestandwerks im Hinblick auf einen verbesserten Informationszugang. Ferner ist eine Preisdatenbank aufzubauen.

Die Bestandserfassung zeigt, dass das Kernsystem innerhalb der Prozesse der Wasserstraßeninfrastruktur mit über 50.000 Bauwerken das Objektkataster ist. Aktuell realisiert die WSV ein neues Objektkataster (Schenk und Laursen (2020)). Neben der Bereitstellung qualitativ hochwertiger Daten in leicht recherchierbarer, nutzerorientierter Form ermöglicht eine eindeutige Objektidentifizierung die Kopplung mit anderen IT-Systemen. Somit bildet das neue Objektkataster als Rückgrat für alle Informationssysteme das digitale Fundament für ein nachhaltiges Infrastrukturmanagement.

Eine aktuelle und umfassende Übersicht über den Stand von laufenden Projekten ist ein wichtiger Bestandteil eines erfolgreichen Infrastrukturmanagements. Aus diesem Grund entsteht aktuell ein zentrales Projektinformationssystem, das einen Überblick und eine Auswertungsmöglichkeit über alle aktuellen, priorisierten Bauprojekte mit relevanten Informationen bietet (Schenk und Laursen (2020)).

4.3 Menschen

In der WSV werden bereits einzelne Digitalisierungsansätze und neue Technologien erprobt. Um das gewonnene Wissen für einen größeren Personenkreis in der WSV nutzbar zu machen, ist ein stärkerer Austausch erforderlich. Neben Aussprachetagen und Workshops wird die koordinierte Nutzung neuer Austauschformate, wie z. B. Lernvideos, Online-Foren oder Blogs, empfohlen. Sie ermöglichen einen zeit- und ortsunabhängig Zugriff auf das spezielle Wissen. Eine weitere Empfehlung im Handlungsfeld Mensch ist die Einrichtung eines Innovation Labs, das die Beschäftigten bei der Erprobung neuer moderner Werkzeuge unterstützt. Damit können Erfahrungen schnell und einfach gesammelt und die Technologie hinsichtlich weiterer Nutzung bewertet werden.

4.4 Grundlagen

Das Handlungsfeld Grundlagen fordert einen flächendeckenden, bedarfsgerechten Netzwerkzugang, auch entlang der Wasserstraßen. Darüber hinaus ist für die effektive, ortsunabhängige Zusammenarbeit die Bereitstellung digitaler Kommunikationswerkzeuge erforderlich, z. B. in Form von Webkonferenzen.

5 Zusammenfassung

Die Digitalisierung schreitet in allen Lebensbereichen mit großer Dynamik voran und bietet für Planen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßen große Chancen. Damit der Verkehrswasserbau von dem digitalen Wandel profitieren kann, bedarf es einer klar definierten Digitalisierungsstrategie.

Für einen umfassenden Digitalisierungsansatz hat die BAW vier Handlungsfelder identifiziert: Prozesse, Daten, Menschen und Grundlagen. Für jedes dieser Handlungsfelder wurden Ziele und Handlungsempfehlungen erarbeitet. Neben konkreten Empfehlungen, wie z. B. die Einrichtung einer Digitalisierungskoordination zur fachübergreifenden Steuerung, die Etablierung eines neuen Objektkatasters als Rückgrat der Informationsmodelle sowie die Einrichtung eines zentralen Projektinformationssystems, wurden auch perspektivische Empfehlungen formuliert, wie z. B. die stärkere Standardisierung der Prozesse für Planen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßeninfrastruktur. Die formulierten Ziele und Empfehlungen bilden eine wichtige Grundlage für die erfolgreiche Digitalisierung im Verkehrswasserbau.

6 Literatur

- BMVI (2015a): Reformkommission Bau von Großprojekten. Komplexität beherrschen – kostengerecht, termintreu und effizient. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin 2015
- BMVI (2015b): Stufenplan Digitales Planen und Bauen – Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin 2015
- Borrmann, A., König, M., Koch, Ch. (2015): Building Information Modeling, Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer Vieweg, 2015
- DIN EN ISO 9000:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015)

Schenk, D., Laursen, Ch. (2020): Digitalisierung im Verkehrswasserbau: Aktuelle Entwicklungen, 43. Dresdner Wasserbaukolloquium, Dresden 2020

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann

Dr.-Ing. Jörg Bödefeld

Dr.-Ing. Zorana Duric

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstraße 17

76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726 3000

Fax: +49 721 9726 5230

E-Mail: christoph.heinzelmann@baw.de
joerg.boedefeld@baw.de
zorana.duric@baw.de

Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen im Wasserbau

Mohammad Zounemat-Kermani
Elena Matta
Reinhard Hinkelmann

Künstliche neuronale Netze (KNN) haben sich bereits als leistungsfähige Methoden für eine Reihe von Fragestellungen im Wasserbau erwiesen. Nach einer kurzen Einführung zu Methoden und Werkzeugen wird die Anwendung von KNN für die Vorhersage von Wasserständen für die Binnenschifffahrt, von Abflüssen und Sedimenttransport, von langfristigen Depositions- und Erosionsvorgängen sowie von Geruch in abwassertechnischen Anlagen beschrieben. Aufgrund der stetig wachsenden Verfügbarkeit von Daten, Methoden und Werkzeugen sowie der relativ kurzen Rechenzeiten werden KNN zukünftig stark an Bedeutung im Wasserbau gewinnen. Nachteilig ist ihre eingeschränkte Übertragbarkeit.

Stichworte: Künstliche Neuronale Netze, Big Data, FFBP, LSTM, NARX

1 Einleitung

Künstliche neuronale Netze (KNN, ANN: Artificial Neural Networks) haben eine breite Anwendung im Wasser- und Umweltingenieurwesen gefunden, so auch im Wasserbau. Das gewachsene Interesse in den letzten Jahren resultiert zum einen aus der stetig wachsenden Verfügbarkeit von Daten ('Big Data') und zum anderen aus der Verfügbarkeit von Modellen und Methoden bzw. Toolboxen, von denen viele Open Source sind.

2 Methoden

Bei KNN handelt es sich um rein datengetriebene oder Black-Box Modelle, d.h. es werden ‚nur‘ Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems benötigt. Umfangreiche und flächendetaillierte Informationen, beispielsweise zu

Höhen, Landnutzung, Böden, Anfangs- und Randbedingungen, wie hydrologische und hydro-numerische Modelle es in unterschiedlichen Auflösungen benötigen, sind nicht erforderlich. Weiterhin sind die Rechenzeiten i.d.R. relativ kurz, da – insbesondere im Vergleich zu hydro-numerischen Modellen – keine großen Systeme partieller Differentialgleichungen mit vielen Hunderttausenden oder Millionen Knoten gelöst werden müssen.

Bei KNN handelt es sich um verknüpfte Netzwerke, die i.d.R. aus drei Schichten (Input, Hidden und Output Layer) bestehen (Abb. 1). Die Layer sind verknüpft durch Neuronen, die Information erhalten, verarbeiten und weiterleiten. Bei klassischen KNN ist der Informationsfluss vom Input über den Hidden zum Output Layer (feed forward; z.B. Multi-Layer Perceptron Neural Network, MLP), während fortgeschrittenere Techniken wie rekurrente KNN auch den Rückfluss von Informationen berücksichtigen und so ein Erinnerungsvermögen abbilden (z.B. Long Short-Term Memory Neural Network, LSTM). Zur Weiterleitung der Informationen, zu deren Verarbeitung sowie zu beiden Gruppen (feed forward, recurrent) gibt es eine Reihe von Methoden (Mosavi et al. 2018).

KNN werden in eine Trainings- bzw. Kalibrierungs- und eine Test- bzw. Validierungsphase untergliedert. Hierfür sind große Datensätze wünschenswert, es sollten mindestens etwa 500 Daten zur Verfügung stehen. Ca. 70 – 80 % der Daten wird für das Training verwendet, der Rest für das Testen. Im Anschluss sind sie dann für Vorhersagen einsetzbar.

KNN sind beispielsweise verfügbar in OpenNN (www.opennn.net), Keras (<https://keras.io>) in Verbindung mit TensorFlow (www.tensorflow.org), MATLAB oder R, wobei insbesondere die Open Source Tools Hochleistungsrechnen (Paralleles Rechnen; Graphical Processing Units, GPU) nutzen.

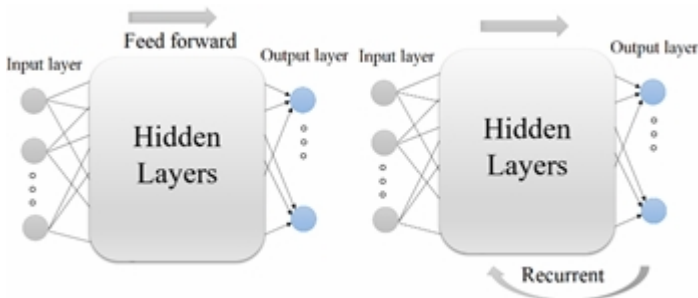


Abbildung 1: Struktur von feed forward und rekurrenten KNN

3 Anwendungen von KNN

3.1 Vorhersage von Wasserständen für die Binnenschifffahrt

Im Rahmen des Forschungsprojektes ‚Digitaler Schifffahrtsassistent‘ wurde in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG), Koblenz und dem Unternehmen BearingPoint, Berlin eine bedarfsorientierte Anwendung (App) zur Routen- und Ladungsplanung für die Binnenschifffahrt entwickelt (Schmidt et al. 2019). Ein wesentlicher Bestandteil dieser App waren Wasserstandsvorhersagen mit einem zeitlichen Horizont von bis zu 10 Tagen. Neben einem hydrologischen Modell der BFG wurde der Einsatz von KNN für verschiedene Pegel im Rheineinzugsgebiet untersucht (Abb. 2). Die Grundidee bestand aus der Vorhersage des Wasserstandes an einem Unterstrompegel anhand mehrerer gemessener Oberstrompegel, wobei bei den KNN die Methode Long Short-Term Memory (LSTM) des Open-Source Tools Keras eingesetzt wurde. Die Datenbasis bestand aus Tageswerten des Wasserstandes über mehrere Jahrzehnte. Beste Ergebnisse wurden durch eine Kombination der Methoden erzielt, indem die Ergebnisse des hydrologischen Modells als zusätzliche Eingangsgröße in das KNN eingebunden wurden, was zu den höchsten Bestimmtheitskoeffizienten am für Niedrigwasser kritischen Pegel Oestrich führte (Abb. 3, Ma et al. 2019).



Abbildung 2: Einzugsgebiet des Rheins bis zum Pegel Emmerich
 (Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG), Koblenz)

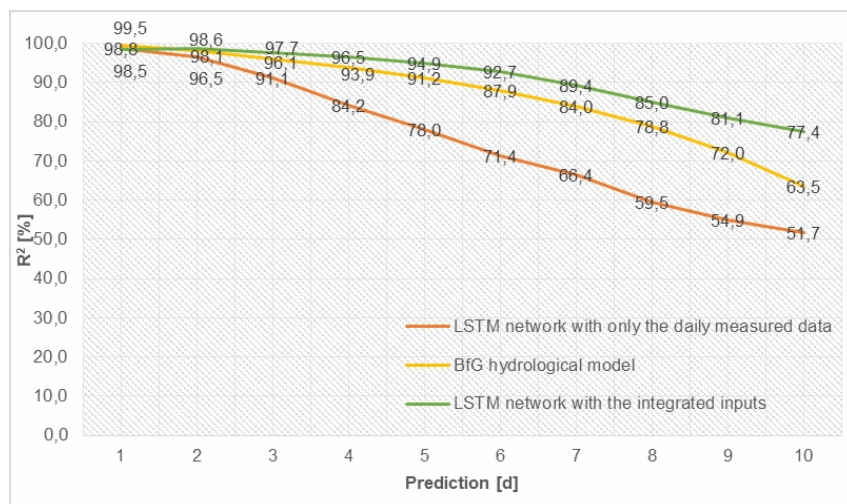


Abbildung 3: Bestimmtheitskoeffizient R^2 für verschiedene Modelle (Zielpegel: Oestrich); aus *Ma et al. (2019)*

3.2 Vorhersage von Abflüssen und Sedimenttransport

Die Abflussvorhersage spielt eine wichtige Rolle in vielen Fragestellungen von Wasserbau und Wasserwirtschaft. Von besonderer Bedeutung ist hier u.a. die Vorhersage der Abflusspeaks sowie ihrer Zeitpunkte. Für solche Fragestellungen werden KNN in den letzten Jahren vermehrt eingesetzt (z.B. Sharma et al. 2015). In einer Studie von Ghorbani et al. (2019) wurden verschiedene Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) einschließlich KNN bzw. Multi-layer Perceptron (MLP) unter Verwendung von MATLAB für die Abflussvorhersage des Flusses Zarrineh im Iran eingesetzt, wobei die hohe Leistungsfähigkeit aller Methoden bestätigt wurde (Abb. 4).

Die Vorhersage von Sedimenttransport ist ebenfalls von großer Bedeutung im Wasserbau und in der Wasserwirtschaft. Sedimente werden im Einzugsgebiet oder im Flusslauf durch Erosionsvorgänge mobilisiert und lagern sich in Stauräumen ab, was zu einer Verminderung des Stauvolumens und entsprechender Gegenmaßnahmen (z.B. Ausbaggerungen) führt. Es ist daher wünschenswert, möglichst genaue Vorhersagewerkzeuge zu entwickeln und KNN werden seit einigen Jahren ebenfalls für solche Problemstellungen eingesetzt. Zounemat-Kermani (2016) haben verschiedene Metho-

den, u.a. auch KNN bzw. MLP unter Verwendung von MATLAB, für die Vorhersage von Schwebstoffkonzentrationen im Fluss San Joaquin, Kalifornien basierend auf gemessenen Zeitreihen verglichen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass alle Methoden sehr gut geeignet sind für eintägige Vorhersagen (Korrelationskoeffizient > 0.9 , Nash-Sutcliffe Koeffizient > 0.85). In Abbildung 5 sind die Residuen der Schwebstoffkonzentrationen (Differenzen aus Berechnung und Messung) sowie ein Vergleich berechneter und gemessener Schwebstoffkonzentrationen im Streudiagramm bzw. Scatterplot dargestellt.

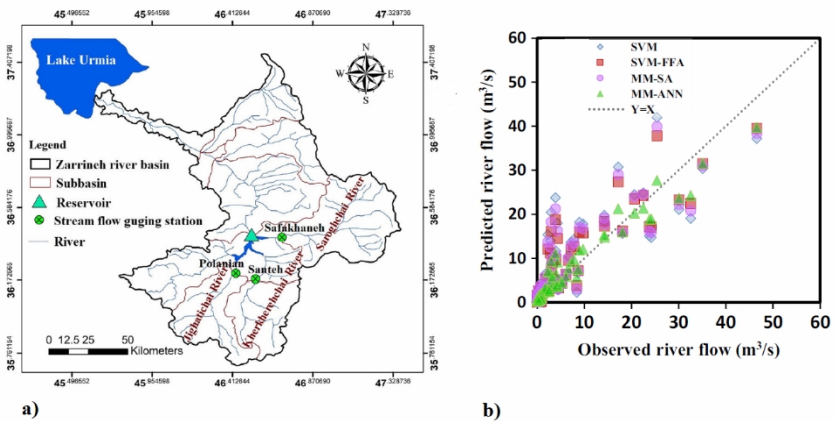


Abbildung 4: a) Modellgebiet im Nordwesten Irans mit Pegelstationen, b) mit KNN bzw. MLP berechnete und gemessene Abflüsse in der Testphase (SVM: Support Vector Machine; SVM-FFA: SVM kombiniert mit Firefly Algorithm; MM-SA: Multiple Models – Simple Averaging; MM-ANN: Multiple Models KNN)

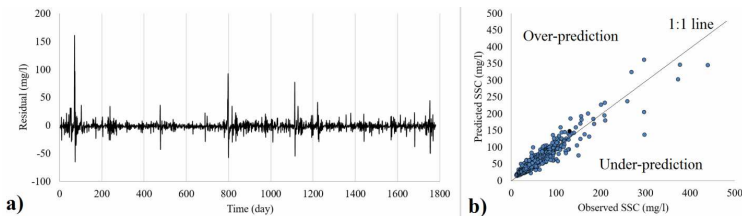


Abbildung 5: Mit KNN bzw. MLP berechnete und gemessene Schwebstoffkonzentrationen in der Testphase: a) Residuen, b) Scatterplot

3.3 Vorhersage von langfristigen Depositions- und Erosionsvorgängen

Im Rahmen eines Forschungsprojektes (Zhang, Hinkelmann 2017) und der Dissertation von Zhang (2018) wurden konzeptionelle Vereinfachungen für langfristige Sedimentationsprozesse bis 2100 entwickelt, wobei der Schwerpunkt auf der Ermittlung von Depositions- und Erosionsmengen im Bereich der Staustufe Iffezheim lag. Hierzu wurden auch KNN eingesetzt, wobei die Methoden Feed Forward Back Propagation (FFBP) und sog. Wavelet ANN (WANN) unter Verwendung von MATLAB verwendet wurden. Die täglichen Vorhersagen der Sedimentkonzentrationen basierten auf Werten der Abflüsse des aktuellen Tages sowie Werten der Abflüsse und Sedimentkonzentrationen mehrerer Vortage, wobei für die Phasen Kalibrierung bzw. Training und Validierung bzw. Testen ein Datensatz von täglichen Werten von Sedimentkonzentrationen und Abflüssen über 36 Jahren von der BFG zur Verfügung gestellt wurde. Ein Vergleich der beiden KNN untereinander und mit einer klassischen Sedimentkonzentrations-Abfluss-Beziehung (SRC) anhand von drei Fehlerkriterien zeigte, dass KNN bzw. FFBP in den meisten Fällen (deutlich) besser als WANN und SRC ist (Abb. 6). Darauf aufbauend wurden mit dem KNN Vorhersagen der Sedimentkonzentrationen bis 2100 durchgeführt, wobei Abflussvorhersagen bzw. -projektionen aus dem KLIWAS Programm (KLIWAS 2015) seitens der BFG bereitgestellt wurden (Abb. 7).

Model	Optimized structure	Calibration			Validation		
		RMSE (mg/l)	MBE (mg/l)	DC	RMSE (mg/l)	MBE (mg/l)	DC
ANN	5,8,1	11.515	-0.678	0.71	10.517	-1.305	0.52
WANN	5,2,1	16.950	-3.231	0.33	10.723	-0.313	0.49
SRC	-	17.011	0.0258	0.34	10.983	-3.021	0.46

Abbildung 6: Vergleich unterschiedlicher Methoden (ANN: Artificial Neural Network, hier KNN; WANN: Wavelet ANN; SRC: Sediment-Rating Curve, Error, Wurzel der mittleren quadratischen Fehlersumme; MBE: Mean Bias Sedimentkonzentrations-Abfluss-Beziehung) anhand unterschiedlicher Fehlerkriterien (RMSE: Root Mean Square Error, mittlerer Fehler; DC: Determination Coefficient, Bestimmtheitskoeffizient); aus Zhang (2018)

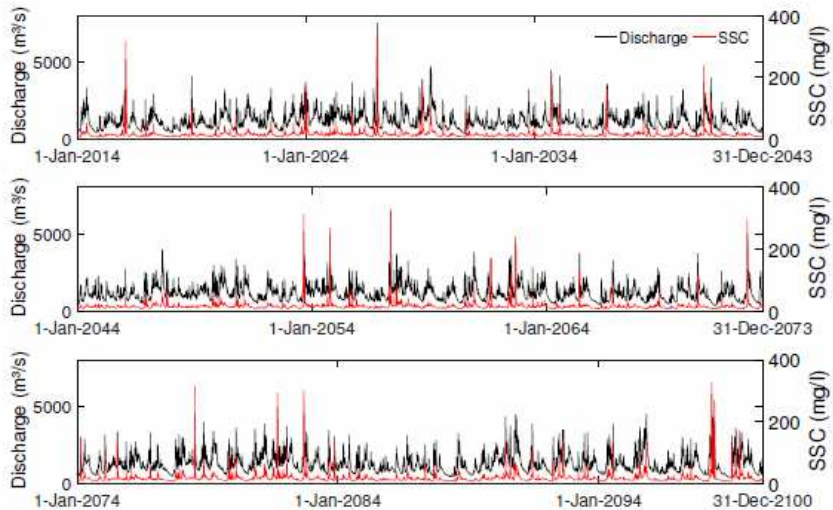


Abbildung 7: Vorhersage der Sedimentkonzentrationen bis 2100 mit KNN basierend auf Abflussprojektionen von *KLWAS* (2015); aus Zhang (2018)

3.4 Vorhersage von Geruch in abwassertechnischen Anlagen

Kläranlagen und Kanalnetzsysteme erzeugen und emittieren beträchtliche Mengen an geruchsbeeinträchtigenden Gasen wie z.B. Schwefelwasserstoff (H_2S) oder Lachgas (N_2O). Um entsprechende Gegenmaßnahmen möglichst gezielt einsetzen zu können, sind Vorhersagewerkzeuge von großer Bedeutung. Auf der einen Seite gibt es verschiedene prozessorientierte empirische und numerische Modelle. Auf der anderen Seite wurden in der Vergangenheit bereits viele Datensätze zu dieser Problematik erhoben und sind seit einiger Zeit in entsprechenden Datenbanken verfügbar, was den Einsatz von KNN nahelegt. Auch wenn es erste Arbeiten hierzu gibt, so befindet sich diese Thematik noch in einer frühen Phase. In diesem Kontext haben Zounemat-Kermani et al. (2019) einen Überblick über den Einsatz von KNN für die Vorhersage von Geruch bzw. Schwefelwasserstoffemissionen in abwassertechnischen Anlagen gegeben und Berechnungen mit fünf Eingangsgrößen (gelöste Schwefelkomponenten, biochemischer Sauerstoffbedarf, Temperatur, Abfluss und pH-Wert) durchgeführt. Als Methode wurde Multivariate Nonlinear Autoregressive Exogenous Neural Network (NARX) in MATLAB entwickelt und für die Vorhersage der wöchentlichen Schwefelwasserstoffkonzentrationen in einer Kläranlage angewandt. In

Abbildung 8 ist ein Vergleich von NARX mit Regressionsmethoden (Multiple Linear Regression, MLR; Stepwise Regression, SR; Two-Variate Logarithmic Regression, TVLR) und Messwerten dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass NARX dichter an den Messwerten liegt als die Regressionsmethoden.

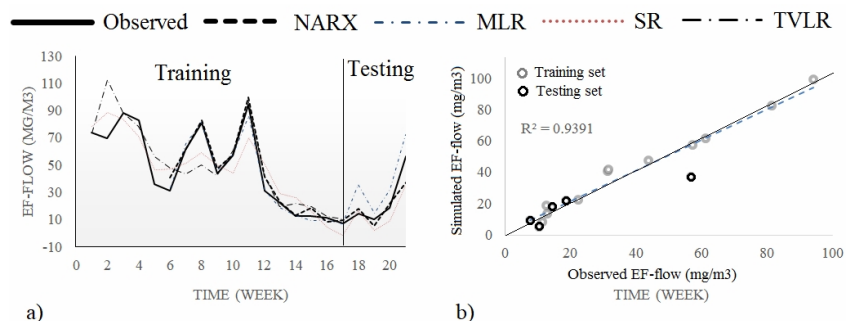


Abbildung 8: a) Vergleich von mit unterschiedlichen Methoden berechneten und gemessenen Schwefelwasserstoffkonzentrationen (EF-FLOW: Emission Factor Flow, Schwefelwasserstoffkonzentration) b) Scatterplot von NARX; verändert nach Zounemat-Kermani et al. (2019)

4 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Beitrages konnte aufgezeigt werden, dass KNN bereits in mehreren Bereichen des Wasserbaus erfolgreich eingesetzt und vielversprechende Ergebnisse erzielt wurden. KNN können grundsätzlich in Betracht gezogen werden, wenn zu einer Fragestellung umfangreiche Daten zur Verfügung stehen. Es existieren verschiedene Methoden und leistungsfähige Werkzeuge (auch Open Source). KNN können ohne Alternativmethode sein, können besser sein als klassische Methoden oder können in Kombination mit klassischen Methoden zu verbesserten Vorhersagen führen. Zum Arbeiten mit KNN sind eigentlich keine speziellen Kenntnisse erforderlich; bei der Auswahl der Modelltechnik, der zahlreichen Parameteroptionen innerhalb der Techniken und der zu berücksichtigenden Eingangsgrößen sind gute Grundkenntnisse in der zu bearbeitenden Fragestellung vorteilhaft. Vorteilhaft ist weiter, dass KNN nur relativ kurze Rechenzeiten erfordern, insbesondere wenn sie mit mehrdimensionalen hydro-numerischen Modellen verglichen werden. Im Zuge der stetig wachsenden Verfügbarkeit von Daten (Big

Data), Methoden und Werkzeugen ist davon auszugehen, dass KNN stark an Bedeutung gewinnen und sich weitere Potentiale im Wasserbau und vielen weiteren Disziplinen erschließen werden.

Nachteilig bei KNN ist, dass ihre Übertragbarkeit sehr eingeschränkt ist. Für ein ähnliches Problem kann eventuell die Netzwerkarchitektur übernommen werden, die Parametereinstellungen müssen sicherlich angepasst werden. Ggf. sind aber doch andere Architekturen besser und / oder weitere Eingangsgrößen in Betracht zu ziehen. Etwas überspitzt formuliert kann man sagen, dass man für ein neues Problem ,quasi wieder bei null beginnt.

5 Literatur

- Ghorbani, M. A., Khatibi, R., Karimi, V., Yaseen, Z. M., & Zounemat-Kermani, M. (2018): Learning from multiple models using artificial intelligence to improve model prediction accuracies: application to river flows. *Water resources management*, 32(13), 4201-4215
- KLIWAS (2015): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, Bonn
- Ma, Y., Matta, E., Meißner, D., Schellenberg, H. & Hinkelmann, R. (2019): Can machine learning improve the accuracy of water level forecasts for inland navigation? Case study: Rhine River Basin, Germany. 38th IAHR World Congress Panama City 2019, Water - Connecting the world
- Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K. W. (2018): Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Water*, 10(11), 1536
- Schmidt, A., Schellenberg, H., Tretter, G., Hinkelmann, R., Matta, E., Scheer, C., Meißner, D. und Richter, J. (2019): Entwicklung eines digitalen Schifffahrtsassistenten. Forschungsbericht, Förderkennzeichen: 19F2051A bis D, mFUND, Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, Bonn
- Sharma, N., Zakaulah, M., Tiwari, H., & Kumar, D. (2015): Runoff and sediment yield modeling using ANN and support vector machines: a case study from Nepal watershed. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(3), 23
- Zhang, Q. (2018): Conceptual simplifications for long-term sediment transport simulations: application to Iffezheim reservoir, Germany. Dissertation, Nr. 25, Schriftenreihe des Instituts für Bauingenieurwesen, Technische Universität Berlin
- Zhang, Q. & Hinkelmann, R. (2017): Abschätzung der Langzeitvolumen-änderung an der Staustufe Iffezheim. Abschlussbericht zum BFG-Projekt Sedimentmanagement Oberrhein

Zounemat-Kermani, M. (2016): Assessment of several nonlinear methods in forecasting suspended sediment concentration in streams. *Hydrology Research*, 48(5), 1240-1252

Zounemat-Kermani, M., Stephan, D., & Hinkelmann, R. (2019): Multivariate NARX neural network in prediction gaseous emissions within the influent chamber of wastewater treatment plants. *Atmospheric Pollution Research*, 10(6), 1812-1822

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Alexander von Humboldt-Stiftung für die Bereitstellung eines Georg Forster-Forschungsstipendiums für erfahrene Wissenschaftler an Prof. Mohammad Zounemat-Kermani am Fachgebiet Wasserwirtschaft und Hydrosystemmodellierung, TU Berlin.

Autoren:

Prof. Mohammad Zounemat-Kermani Dr. Elena Matta

Department of Water Engineering
Shahid Bahonar University of Kerman
Bahman Blvd. 22
76169-14111 Kerman
Iran

Tel.: +98 34 3132 2668
Fax: +98 34 3132 2600
E-Mail: zounemat@uk.ac.ir

Department Water Engineering
Campus El Gouna
Technische Universität Berlin
Ackerstr. 76
13355 Berlin

Tel.: +49 30 314 75711
Fax: +49 30 314 75716
E-Mail: elena.matta@tu-berlin.de

Prof. Reinhard Hinkelmann

Fachgebiet Wasserwirtschaft und
Hydrosystemmodellierung
Technische Universität Berlin
Gustav-Meyer Allee 25
13355 Berlin

Tel.: +49 30 314 72428
Fax: +49 30 314 72430
E-Mail: reinhard.hinkelmann@
 wahyd.tu-berlin.de

Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) für die Optimierung von Planungsprozessen im Wasserbau

Patrycja-Jadwiga Sankowska
Nina Kumbruck
Dr. Christian Leyh
Dr. Andreas Niekler
Dr. Daniel Wiegrefe

Planungs- und Bauvorhaben werden durch zunehmende Informations- und Datenmengen komplexer. Das kann dazu führen, dass die ursprünglich festgelegten Ziele im Laufe von Projekten schwerer nachzuhalten sind. In der Folge können Kommunikationskonflikte, intransparente Leistungsüberschneidungen und aufwendige Zuarbeiten entstehen. Das trifft auch auf Projekte im Wasserbau zu, die sich durch eine hohe Anzahl an Stakeholdern auszeichnen. Die Harmonisierung der Ansprüche kann zu langwierigen Planungs- und Genehmigungsprozessen führen. Diese Problematik wird in dem vorgestellten Forschungsvorhaben untersucht, um zu prüfen, ob durch Einsatz der künstlichen Intelligenz (KI) eine neue Form der interessengruppenorientierten Prozesssteuerung entstehen kann.

Stichworte: Künstliche Intelligenz, Data Mining, intelligente Dokumentationsassistenten, interessengruppenorientierte Prozesssteuerung

1 Einleitung

1.1 Wertschöpfung durch künstliche Intelligenz

Die fortschreitende und stetige Digitalisierung der Gesellschaft mit den damit verbundenen Veränderungen ist heute auch im Alltag der Unternehmen angekommen. Technologien wie Cloud Computing, die zunehmende Automatisierung, z. B. im Sinne von Industry 4.0-Ansätzen, oder der Einsatz mobiler Endgeräte sind nur einige Beispiele für die Digitalisierung, die den Unternehmen ganz neue Möglichkeiten im Unternehmensalltag

eröffnen. Diese neuen technologischen Möglichkeiten in Kombination mit der weiteren Integration intelligenter Objekte, die die physische mit der digitalen Welt verschmelzen, führen zu neuen und grundlegenden Paradigmenwechseln. Insgesamt verschwimmen durch diese zunehmenden Digitalisierungsmöglichkeiten für die Unternehmen die Grenzen der wertschöpfenden und unterstützenden Prozesse, wodurch sich die traditionellen Lieferketten- und Stakeholder-Beziehungen eines Unternehmens mit ihren nachgelagerten Prozessen zu einem ganzheitlichen Wertschöpfungsnetzwerk entwickeln. Diese Entwicklungen haben daher entscheidende technologische und vielfältige organisatorische Auswirkungen, wie z.B. drastische Veränderungen der Geschäftsprozesse, Umsetzung neuer Geschäftsmodelle, erhöhte Anforderungen an das Business Process Reengineering, etc. Diese verstärkte Vernetzung von Prozessen und Informationssystemen und damit die zunehmende Menge an Daten, die gemeinsam genutzt, übertragen, gespeichert und analysiert werden müssen, wird von Unternehmen jedoch häufig als Problem wahrgenommen (*Bley, Leyh & Schäffer 2016; Leyh et al. 2017; Mathrani, Mathrani & Viehland 2013; Pagani 2013*).

Aufgrund der Vielfalt der Softwarelandschaft eines Unternehmens selbst aber auch im gesamten Wertschöpfungsnetzwerk in Kombination mit der stetig wachsenden Vernetzung der unterschiedlichen Softwaresysteme werden die Daten selbst zu einem wesentlichen und kritischen Faktor. Daten werden auch weiterhin die Grundlage der digitalen Wirtschaft sein und mehr noch als im letzten Jahrzehnt müssen Unternehmen heute, um im globalen Geschäftsumfeld wettbewerbsfähig zu werden und zu bleiben, große Datenmengen automatisiert zwischen internen Abteilungen und über Unternehmensgrenzen hinweg mit Geschäftspartnern austauschen (*Pepard & Rylander 2006; Sambamurthy, Bharadwaj & Grover 2003*). Neben den technischen Aspekten der Datenerfassung, des Datenaustauschs und der Datenverteilung gewinnen sozioökonomische Fragen zur Wertigkeit und Bewertung von Daten, deren konkreter Nutzung in unterschiedlichen Anwendungskontexten und die zukünftige Organisation von Wertschöpfungsnetzwerken zunehmend an Bedeutung. So ist es nicht verwunderlich, dass heutzutage Themen wie Datenmanagement, Datenanalyse, Künstliche Intelligenz oder Data Science für Unternehmen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Immer mehr Unternehmen erkennen das Potenzial von Daten und deren Auswertemethoden. Allerdings sehen sich Unternehmen mit zahlreichen Herausforderungen konfrontiert, wie z. B. unzureichende Datenqualität, Einschränkungen der eigenen Datenarchitektur oder des Datenschutzes

(siehe z. B.: *Österle & Otto 2014*) oder fehlendes Wissen, welches konkrete Werkzeug, welcher Algorithmus, welche Methode ihnen helfen könnte, den Nutzen und Wert ihrer Daten zu steigern.

1.2 Untersuchung einer KI-gestützten Wertschöpfung der Daten im Bereich des Wasserbaus auf einem realen Praxisbeispiel

Aufgrund des hohen Komplexitätsgrads der meisten Wasserbauprojekte, hat das Unternehmen seecon Ingenieure GmbH sich entschieden, das laufende Vorhaben „Los2: Zwenkau“ auszuwählen, um schneller zu marktrelevanten, praxisnahen Erkenntnissen während der Forschungslaufzeit zu kommen. Im Rahmen des Gemeinschaftsprojekts „Data Mining und Wertschöpfung“ wird die seecon Ingenieure GmbH zusammen mit dem Fraunhofer-Zentrums für Internationales Management und Wissensökonomie (IMW) und der Fakultät für Informatik der Universität Leipzig eine neue Art der interdisziplinären Projektkommunikation und Durchführung von Bauvorhaben erarbeiten

Auf der Basis von Künstlicher Intelligenz werden strukturierte Datencontainer, intelligente Dokumentationsassistenten (Intelligent Filing Service) und vernetzte Nutzer*innenprofile eingesetzt. Das Ziel ist, eine neue HOAI-basierte Kooperationsbasis zu schaffen, die sich den steigenden Herausforderungen und Möglichkeiten der Digitalisierung in der Baubranche stellen kann.

1.3 Methodologie

An die Forschungsarbeit wird polymethodisch herangegangen. Das Quellen untersuchende Vorgehen beinhaltet Literaturrecherchen hinsichtlich Wertschöpfungskonzepten von Daten (u. a. *Österle, Otto; Pagani*), Business Intelligence (u. a. *Hambuch*), Datencontainer, Metadatenmanagement und Graphen (u. a. *Auch; Zane*). Darüber hinaus werden die Sekundärquellen zum Pilotprojekt „Los 2 Zwenkau“ recherchiert (v. a. Planungsdokumentation). Empirisch sowie explorativ werden diverse Case Studies analysiert sowie Workshops durchgeführt, in der Messinstrumente zur Stakeholder- und Prozessanalyse, wie z. B. morphologischer Kasten, angewendet werden. Dies wird die Basis für das anwendungsausgerichtete Vorgehen sein, das zur Schöpfung eines Mashine Learning Algorithmus führen soll.

1.4 Ziel des Forschungsvorhabens

In erster Linie soll ein Wertschöpfungskonzept entstehen, das durch den Einsatz eines selbstlernenden Systems die Zusammenhänge, Aufgaben und

Verantwortungsspielräume der jeweiligen Planungsakteure aufgreift. Darüber hinaus sollen auf diese Weise die auf einen Planungsserver hochgeladenen Dateien durch ein Intelligent Filing System (IFS) automatisch den entsprechenden Stakeholdern zugewiesen werden. In der zweiten Linie wird ein Algorithmus, der dies ermöglicht auf einer Open-Source-Lizenz der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Kurzfristig wird der wertschöpfende Ansatz durch eine deutliche Zeiterparnis vieler Planungsprozesse gewährleistet. Langfristig soll das Ergebnis des Gemeinschaftsprojekts den Ingenieurbüros dabei helfen, sich effizienter und schneller auf die Digitalisierungswende vorzubereiten. Es soll v. a. das Knowhow zur Entwicklung und Benutzung von digitalen Produkten bringen sowie effektiv die Innovation zum Business Development fördern.

2 „Los 2: Wiederherstellung des Vorflutsystems südlich des ehemaligen Tagebaus Zwenkau“

2.1 Projektbeschreibung

Im Braunkohlegebiet Zwenkau-Cospuden sind Möglichkeiten zur Herstellung eines sich weitgehend selbst regulierenden Gebietswasserhaushaltes unter Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher, ökologischer, regionalplanerischer und wirtschaftlicher Belange sowie bestehender und geplanter Nutzungen herauszuarbeiten, deren Machbarkeit, Nachhaltigkeit und Einklang mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zu prüfen und ihre sonstigen Auswirkungen (Vorteile und Nachteile) aufzuzeigen.

Es wird gefordert, die bergbaubedingt gekappten Wasserläufe zu reaktivieren. Hierzu sind eine Reihe von Teilmaßnahmen, die sich unterteilen lassen in Maßnahmen des Wasserbaus, Ingenieurbaus und der Verkehrsanlagen, notwendig.

Zu den zu bearbeitenden Gewässern gehört die ehemalige Regulierte Weiße Elster mit dem Elsterwehr, die Batschke, der Profener Elstermühlgraben, diverse Grabensysteme sowie der Altarm der Weißen Elster (Alte Elster). Hinzu kommen verschiedene Abschlag-, Zulauf-, Sperr- und Brückenbauwerke sowie Zuwegungen.

2.2 Planungsinhalt, Leistungsspektrum und Planungsakteure (Stakeholder)

Das Projekt beinhaltet Leistungen für Ingenieurbauwerke, Verkehrsanlagen, Tragwerksplanungen und naturschutzfachliche Gutachten in einem Betrachtungsgebiet mit einer Fläche von ca. 875 ha, die zusammen für eine hohe Komplexität der Planungsinhalte und -prozesse sorgen.

Das Vorhaben bündelt bislang 8 Akteure: die LMBV als AG, die ARGE ihc/seecon als Planer, die Sweco GmbH als Projektsteuerer sowie die Stadt Zwenkau, die Landestalsperrenverwaltung Sachsen, die Landesdirektion Sachsen, den Landkreis Leipzig und den Regionalen Planungsverband Leipzig-West Sachsen. Insgesamt werden ca. 30 Personen an dem Projekt im Zeitraum von 2015 bis 2021 beteiligt sein.

2.3 Kommunikation zwischen Stakeholder, Datensammlung

Das Projekt „Los 2 Zwenkau“ wird auf klassische Weise gesteuert. Die Hauptkommunikation sowie der Informationsaustausch werden durch Beratungen von Auftraggeber und Planer-ARGE, Protokollierung, diverse Besprechungen sowie Versenden von E-Mails und Durchführung von Telefonaten realisiert. Die Abspeicherung des E-Mailverkehrs sowie neuer Planungsstände sowie außerhalb von Beratungen getroffener Entscheidungen ist notwendig, um Planungsziele zeitlich und wirtschaftlich einzuhalten sowie Nachträge und Kommunikationsprobleme zu vermeiden. Da es kein nutzerorientiertes, automatisches Zuweisungssystem gibt, benötigen diese Aufgaben viel Zeit und Achtsamkeit.

Der Datenaustausch erfolgt durch Exportieren und Importieren der im Vorfeld vorbereiteten und mit Indices zugewiesenen Dateien auf den web-basierten Planungsserver. Die Dokumente können nach Ablageort sowie Dateiname (Index) identifiziert werden, sie sind jedoch keinen konkreten Nutzern zugeordnet, sondern den generellen Nutzergruppen gemäß ihrer Rolle im Projekt. Die Stakeholder erhalten eine E-Mail-Benachrichtigung über neue Dateien, deren Verwendung auf die Eigennutzung begrenzt ist (z. B. es gibt kein Koordinationsmodell in der Cloud).

3 Intelligente Datencontainer durch maschinelles Lernen und Datenstrukturen

Das Datenmanagement und die Verwaltung von Daten erfolgt in modernen Systemen über die Auswertung von Metadaten, die an die Dateien angehängt werden (Auth, 2004; Hambuch, 2008). Die Informationen reichen von Zeitstempeln der Erstellung oder Autoren bis hin zu Geokoordinaten von Bildaufnahmen. Die Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode ist die Existenz von Metadaten in den Daten. Planende Ingenieure befinden sich hier in einer unkomfortablen Situation, da viele der Daten, die innerhalb der Projektplanung benötigt werden, von weiteren Dienstleistern erstellt und verfügbar gemacht werden müssen. Die Verfügbarkeit von Metadaten entzieht sich aber der eigenen Kontrolle und Qualitätssicherung. Andere Daten werden aus Archiven bereitgestellt und werden teilweise nachdigitalisiert. Die Verfügbarkeit von Metadaten ist gescannten Dokumenten kritisch. Hier wird deutlich, dass die automatische Erstellung von Metadaten für die Organisation von Datenmengen ein enormes Potential bietet. Wenn es gelingt zentrale Informationen aus den Daten selbst zu erstellen, so wäre deren Verwaltung einfacher und unabhängig vom Erstellungsprozess der Daten.

Ein Baustein für die Automatisierung der Erstellung von Metadaten ist die Datenanalyse mit Methoden des maschinellen Lernens. Eine grundlegende Anwendung ist die Erkennung von Text in gescannten Dokumenten. Mit Hilfe der Optical Character Recognition (OCR) werden Textbestandteile erkannt und maschinenlesbar. Die erkannten Texte sind zunächst Textartefakte und haben für die Datenrepräsentation keine Bedeutung. Mit Methoden der automatischen Sprachverarbeitung können diesen Artefakten allerdings Bedeutungen zugeordnet werden. So können Adressköpfe erkannt werden, Briefinhalte erfasst werden oder Konzepte wie Gewerke und Dokumenttypen zugeordnet werden. Diese extrahierten Informationen, sozusagen die Umwandlung unstrukturierter Inhalte in strukturierte Informationen, diesen als Fingerabdruck der Dokumente und ersetzen die manuell erzeugten Metadaten. So verfügbare Informationen können in der Datenverwaltung genutzt werden, um die Dokumente und Datenbestände von Bauprojekten auch zu vernetzen. Beispielsweise werden Dokumente von Personen oder Unternehmen zur Verfügung gestellt. Sie beziehen sich auf bestimmte Bauabschnitte. Teile der Dokumente sind als Gutachten identifizierbar, andere wiederum stellen Rechnungen dar. Die Verbindungen zu

Personen, Gewerken, Bauabschnitten oder gar Projektphasen können in einer intelligenten Datenstruktur aufgehen, welche die nötigen Verbindungen zwischen den beteiligten Stakeholdern und den Projektdaten herstellt. Die genannten Verbindungen können über Graphdatenbanken realisiert werden, deren Kernkompetenz die Repräsentation von Daten und deren Verknüpfungen darstellt (*Eifrem, 2015; Zane, 2016*).

Ein Graph ist eine Menge von sogenannten Knoten, welche die Daten, wie zum Beispiel Dokumente, darstellen. Diese Knoten werden untereinander mit sogenannten Kanten verbunden, um die Daten miteinander zu verknüpfen. Zusätzlich können die Kanten auch Informationen speichern, um die Art der Verknüpfung zu speichern. Durch die Art der Speicherung der Daten sind Informationen in verknüpfter Form verfügbar und repräsentieren so explizite und implizite Informationen. Verknüpfte Informationen erlauben einen effizienten Zugriff auf in den Daten enthaltenes Wissen. Durch die Projektion dieser Verknüpfungen in räumliche Darstellungen, wie zum Beispiel Karten oder Gebäudemodelle, können zudem auch spatiale Zusammenhänge aufgedeckt werden. Hierbei können zum Beispiel Gebiete mit ähnlichen Beschreibungen in den Gutachten miteinander verknüpft werden.

Die Verknüpfung der Daten wird durch einen KI-gestützten Workflow erstellt und bietet dann dem planenden Ingenieur ein datengestütztes Assistenzsystem. Das System unterstützt die tägliche Arbeit der Planung, das Datenmanagement tritt in den Hintergrund und die Kernaufgaben des planenden Ingenieurs treten wieder in den Vordergrund.

4 Fazit und Diskussion

Die frühzeitige Identifizierung der Marktveränderungen und eine Anpassungsfähigkeit der Planungs- und Ingenieurbüros sind in Zeiten der digitalen Ära unverzichtbar. Die stets wachsenden Anforderungen an Innovation, Schnelligkeit und intersektorale Kooperation transformieren das Profil des sozio-ökonomische Nachfrage-Bedarf Verhältnisses und führen zu konsequenten Umstrukturierungen des Dienstleistungsspektrums innerhalb der Ingenieurbranche. Die neuen Geschäftsmodelle und daran angeknüpften Wertschöpfungskonzepte, die Daten als Rohstoff betrachten, sind einer der Möglichkeiten, sich besser in einem Markt zu positionieren sowie schneller an Bedürfnisse des Kunden zu reagieren.

Durch die Automatisierung sich wiederholender Aufgaben, wie Zuordnung der Daten oder Zuweisung der Daten und Aufgaben an die durch festgestellten Planakteure mit IFS, wird der erste Schritt zur Deckung der immer geringeren Zeiträume für Fertigstellung einer Leistung abgesichert. Im Laufe der Forschungsarbeit sollen mehrere kritische Stellen identifiziert werden, die eine ähnliche Zeitersparnis ermöglichen. Ebenso wichtig ist es herauszufinden, in welcher Form der Algorithmus in die Planungsinfrastruktur implementiert werden soll bzw. welche Kompetenzen und IT-Infrastruktur solch eine Implementierung erfordert.

Der tatsächliche Mehrwert besteht darin, Unternehmen bei der Anpassung an die digitale Transformation sowie bei dem Umgang mit Innovation zu helfen.

5 Literatur

- Auth, G. (2004). Prozessorientierte Organisation des Metadatenmanagements für Data-Warehouse-Systeme: Mit 80 Tabellen. Books on Demand GmbH.
- Bley, K., Leyh, C. & Schäffer, T. (2016): Digitization of german enterprises in the production sector – do they know how “digitized” they are? In: Proceedings of the Americas Conference on Information Systems, AMCIS 2016, 11–14 August, San Diego, USA 2016.
- Eifrem, I. Robinson. J. Webber. E. (2015). Graph Databases, 2nd Edition. O'Reilly Media, Inc. <http://proquest.safaribooksonline.com/9781491930885>
- Leyh, C., Schäffer, T., Bley, K. & Forstenhäusler, S. (2017): Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0. In Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions, E. Ziemba (Hrsg.), Springer, Cham 2017, S. 103–119.
- Hambuch, U. (2008). Erfolgsfaktor Metadatenmanagement: Relevanz des Metadatenmanagements für die Datenqualität bei Business Intelligence. VDM Verl. Dr. Müller.
- Mathrani, S., Mathrani, A. & Viehland, D. (2013): Using enterprise systems to realize digital business strategies. In: Journal of Enterprise Information Management, Vol. 26, No.4, 2013, S. 363– 386.
- Österle, H. & Otto, B. (2014): Das datenzentrierte Unternehmen: Eine Business-Engineering-Perspektive. In: Enterprise-Integration, G. Schuh & V. Stich (Hrsg.), Springer Vieweg, Heidelberg 2014, S. 91-105.
- Pagani, M. (2013): Digital Business Strategy and Value Creation: Framing the Dynamic Cycle of Control Points. In: MIS Quarterly, Vol. 37, No. 2, 2013, S. 617-632.

- Peppard, J. & Rylander, A. (2006): From value chain to value network: insights for mobile operators. In: *European Management Journal*, Vol. 24, No. 2-3, 2006, S. 128–141.
- Sambamurthy, V., Bharadwaj, A. & Grover, V. (2003): Shaping agility through digital options: reconceptualizing the role of information technology in contemporary firms. In: *MIS Quarterly*, Vol. 27, No. 2, 2003, S. 237–263.
- Zane, B. (2016, November 2). Semantic Graph Databases: A worthy successor to relational databases. *Database Trends and Applications*. <http://www.dbta.com/BigDataQuarterly/Articles/Semantic-Graph-Databases-A-worthy-successor-to-relational-databases-114569.aspx>

Autoren:

Patrycja-Jadwiga Sankowska

seecon Ingenieure GmbH
Stabstelle Digitalisierung
Spinnereistr. 7, Halle 14
04179 Leipzig

Tel.: +49 341 48405 28
Fax: +49 341 48405 20
E-Mail: patryc-
ja.sankowska@seecon.de

Dr. Christian Leyh

Fraunhofer-Zentrum für internationales
Management und Wissensökonomie
IMW
Digitale Projekteinheit Data Mining und
Wertschöpfung
Neumarkt 9-19
04109 Leipzig

Tel: +49 341 231039 279
E-Mail: christian.leyh@
imw.fraunhofer.de

Nina Kumbruck

seecon Ingenieure GmbH
Fachbereich Wasserbau
Spinnereistr. 7, Halle 14
04179 Leipzig

Tel.: +49 341 48405 30
Fax: +49 341 48405 20
E-Mail: nina.kumbruck@seecon.de

Dr. Andreas Niekler
Dr. Daniel Wiegrefe

Universität Leipzig
Projekt Data Mining und Wertschöp-
fung, Institut für Informatik
Augustusplatz 10
04109 Leipzig

Tel: +49 341 231039 279
E-Mail: aniekler,daniel@informatik.uni-
leipzig.de

Pumpspeicherwerk Forbach – «Alte Technik» gepaart mit neuesten technischen Entwicklungen im Dienste der Energiewende

Robert Achatz

Das Rudolf-Fettweis-Werk Forbach der EnBW wurde zwischen 1914 und 1926 im nördlichen Schwarzwald erbaut und besteht aus insgesamt vier Einzelkraftwerken. Die beiden Hauptkraftwerke, das Schwarzenbach- und das Murgwerk verrichten seit ihrer Inbetriebnahme ohne substantielle Veränderungen zuverlässig ihren Dienst.

Im Zuge der geplanten Erneuerung des Standortes soll das große Potential des Standortes besser ausgeschöpft und das Schwarzenbachwerk zu einem leistungsstarken, mit moderner Technik versehenen Pumpspeicherwerk ausgebaut werden

1 Anlagenkonzept

Das Wasserkraftwerk Rudolf-Fettweis-Werk Forbach der EnBW wurde zwischen 1914 und 1926 im nördlichen Schwarzwald erbaut und besteht aus insgesamt vier Einzelkraftwerken. Die beiden Hauptkraftwerke, das Schwarzenbach- und das Murgwerk verrichten seit ihrer Inbetriebnahme ohne substantielle Veränderungen zuverlässig ihren Dienst.

Das Schwarzenbachwerk verfügt in seiner jetzigen Konstellation über eine Pumpe, mit der Wasser aus dem Murgtal in die Schwarzenbachtalsperre hochgepumpt und über zwei Turbinen, mit denen Wasser aus der Schwarzenbachtalsperre zur Stromerzeugung wieder entnommen werden kann. Das Schwarzenbachwerk war damit bei seiner Inbetriebnahme eines der ersten Kraftwerke, in dem die Technik der Pumpspeicherung im großtechnischen Maßstab zum Einsatz kam.

Im Zuge der geplanten Erneuerung des Standortes soll das große Potential des Standortes besser ausgeschöpft und das Schwarzenbachwerk zu einem leistungsstarken, mit moderner Technik versehenen Pumpspeicherwerk ausgebaut werden.



Standbild aus Projektvisualisierung der EnBW [1]

Die bestehenden Anlagenteile bis zu den Wasserschlössern werden ohne substantielle Veränderungen in das neue Anlagenkonzept integriert.

An den Wasserschlössern binden die neuen Wasserwege der beiden Kraftwerke an und werden über Druckschächte nach unten zur gemeinsamen Kraftwerkskaverne geführt.

Die gesamte elektrische und mechanische Ausrüstung des neuen Pumpspeicherwerkes wird untertage in der Kraftwerkskaverne angeordnet. Hier werden auch die neuen Turbinen des Murgwerks untergebracht.

Sowohl Schwarzenbach- als auch Murgwerk geben ihr Wasser unterwasserseitig in den neuen Kavernenwasserspeicher ab, der mit bestehenden Ausgleichsbecken in Forbach hydraulisch verbunden ist.

2 Unterirdische Speichererweiterung

Während die Schwarzenbachtalsperre, das Oberbecken des Schwarzenbachwerkes, über ein nutzbares Volumen von 14 Mio. m³ verfügt, beträgt der im Ausgleichsbecken Forbach, dem Unterbecken, zur Verfügung stehende Stauraum lediglich 204.000 m³.

Bei gleichzeitigem Vollastbetrieb des Murg- und des Schwarzenbachwerkes im Turbinenmodus beträgt die stündlich ins Ausgleichsbecken Forbach abgegebene Wassermenge ca. 135.000 m³. Die Abgabe vom Ausgleichsbecken in das Unterwasser ist nicht beliebig veränderbar, sondern unterliegt einem komplexen Modus zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Restwasserabgabe unter Berücksichtigung des natürlichen Fließgeschehens in der Murg.

Daher ist das vergleichsweise kleine Volumen des Ausgleichsbeckens in Forbach eine wesentliche Limitierung des Betriebes des bestehenden Rudolf-Fettweis-Werkes.

Ein zentraler Aspekt der Überlegungen zur Erneuerung des Standortes war daher von Beginn an die Erhöhung des Speichervolumens des Ausgleichsbeckens. Konventionelle Konzepte wie Stauzielerhöhung am bestehenden Becken oder Schaffung eines zusätzlichen Beckens im Murgtal mussten bereits in frühem Stadium aufgrund der vorhandenen Randbedingungen wie Bebauung entlang des Ausgleichsbeckens, Zielkonflikten mit Natur- und Artenschutz als nicht umsetzbar verworfen werden.



Abbildung 1: Ausgleichsbecken Forbach mit Rudolf-Fettweis-Werk

Das gewünschte zusätzliche Volumen wird daher durch ein unterirdisches Tunnelsystem geschaffen. Ein Hauptstollen, der die Kraftwerkskaverne mit dem Ausgleichsbecken verbindet und sechs Nebestollen stellen ein zusätzliches Speichervolumen von 200.000 m³ zur Verfügung. Die Gesamtlänge der Speicherstollen beträgt ca. 2,7 km. Die Wasserspiegelschwankung in den Speicherstollen zwischen Stau- und Absenksziel liegt analog dem Ausgleichsbecken bei 6,1 m.

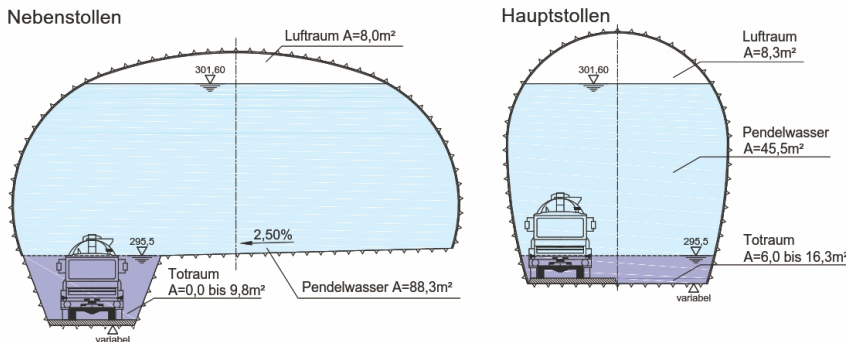


Abbildung 2: Haupt und Nebestollen des Kavernenwasserspeichers

Das gewählte Konzept reduziert die Auswirkungen auf Umwelt, Mensch und Natur im Wesentlichen auf die durch das Baugeschehen hervorgerufenen, zeitlich begrenzten Auswirkungen

3 Drehzahlvariable Pumpturbine

Als hydraulische Maschine des neuen Schwarzenbachwerks kommt eine reversible Pumpturbine zu Einsatz.

Durch die Verwendung eines Synchron-Motorgenerators in Verbindung mit elektronischer Frequenzumrichtertechnik kann die Drehzahl des Pumpspeichersatzes verändert und der Einsatzbereich des Pumpspeicherkraftwerkes erweitert werden.

Der elektronische Frequenzumrichter ermöglicht eine Variation der Drehzahl und damit eine Leistungsregulierung auch im Pumpbetrieb. Der Regelbereich der „50 MW-Maschine“ im Pumpbetrieb liegt dabei zwischen ca. 30 bis 35 MW und der Nennleistung der Maschine.

Die Verbindung des Pumpturbinensatzes mit der dem Frequenzumrichter ermöglicht auch einen sehr schnellen Wechsel zwischen den einzelnen Betriebsarten. Derzeit wird von einer Umstellzeit von Pump- auf Turbinenbetrieb innerhalb von nur 110 s und von Turbinen-auf Pumpbetrieb von 140 s ausgegangen.

Bei diesen Werten wie auch beim erwarteten Regelbereich im Pumpbetrieb handelt es sich um vorläufige Auslegungswerte. Die tatsächlichen Werte werden letztlich aus den Detailbetrachtungen der möglichen Hersteller des Pumpspeichersatzes resultieren.

Die kurzen Umstellzeiten gehen auch mit erhöhten Anforderungen an den Wasserweg einher. Aus dem schnellen Wechsel der Betriebsarten und den damit einhergehenden Wasserbewegungen dürfen keine unzulässigen hydraulischen Auswirkungen wie Überschreitung der maximalen oder minimalen Wasserspiegellagen im Wasserschloss, Unterdruck in der Leitung etc. resultieren.

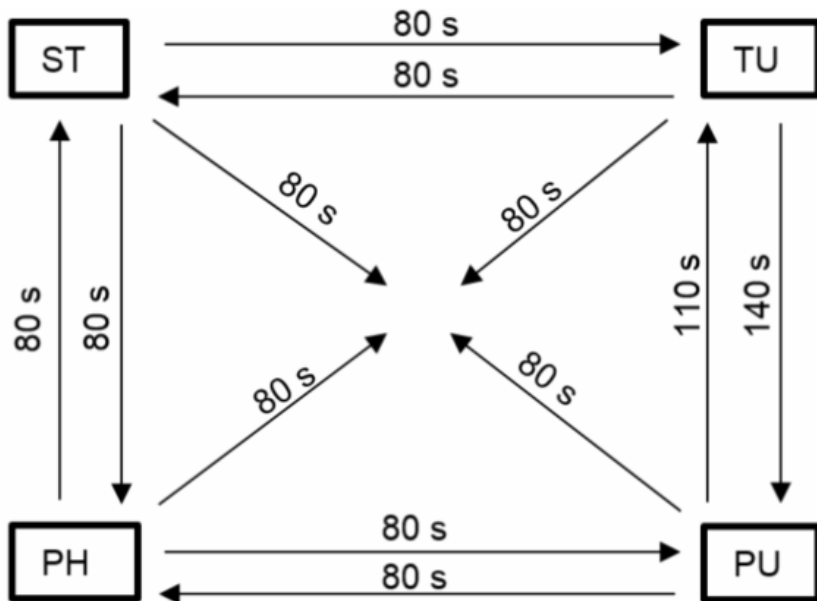


Abbildung 3: Vorläufige Umschaltzeiten zwischen den Betriebsarten der Pumpturbine als Grundlage für die hydraulische Überprüfung des Wasserweges (ST = Stillstand, TU = Turbinieren, PU = Pumpen, PH = Phasenschieberbetrieb)

Die Drehzahlvariabilität bietet eine deutlich höhere Flexibilität als herkömmliche Pumpspeicherkraftwerke mit konventioneller Technik und sind daher hervorragend zur Netzregulierung geeignet.

4 Verwendung von BIM in Planung und Umsetzung

Bereits in der Entwurfsphase war das Stollensystem des neuen Pumpspeicherkwerkes sowie die Kraftwerkskaverne in 3D geplant worden. Die 3D-Planungen bildeten weiterhin eine Grundlage für Visualisierung des neuen Kraftwerkes durch die EnBW.

Derzeit laufen die Ausschreibungen und Vergaben für das Gesamtprojekt erstellt. Hierbei kommt BIM (Building Information Modelling) als neuartiger Planungsansatz zum Einsatz. Es wurden BIM Modelle der Maschinenkaverne, des Auslaufbauwerkes und des Portalgebäudes des Zufahrtsstollens erstellt.

Neben den baulichen Anlagen wurden in den BIM Modellen auch die raumbedeutsamen Ausrüstungen wie u.a. Hauptrohrleitungen, Lüftungskanäle oder Hauptkabelwege abgebildet.

Die BIM-Modelle wurden bereits im Zuge der Ausschreibung den Bietern des Bauloses als zusätzliche Arbeitsgrundlage für ihr Angebot zur Verfügung gestellt werden.

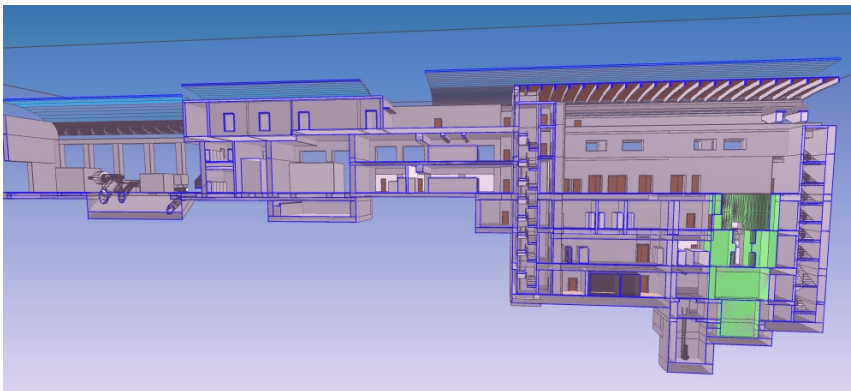


Abbildung 4: Schnitt durch BIM Modell der Kraftwerkskaverne

Im Zuge der weiteren Planung ist vorgesehen das BIM Modell als zentrales Planungsinstrument zu verwenden und die Planungen der Bautechnik, des Maschinenbaus und der Elektrotechnik im BIM Modell zusammenzuführen. Das BIM Modell stellt damit die zentrale und alleinige Planungsgrundlage für die Herstellung wesentlicher Bestandteile des neuen Pumpspeicherwerkes dar.

Es bietet sich damit auch die Möglichkeit das BIM Modell zum Bestandsmodell weiter zu entwickeln.

5 Pumpspeicherkraftwerk Forbach im Rahmen der Energiewende

Der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Gesamtstromerzeugung in Deutschland betrug 2018 ca. 38 % [2].

Knapp 2,6 % der Erzeugung aus Erneuerbaren Energien mussten im Rahmen des Einspeisemanagements in 2018 abgeregelt werden. Das entspricht einer Strommenge von 5.403 GWh. Die Entschädigungsansprüche der Anlagenbetreiber für die abgeregelte Strommenge werden auf 635 Mio. Euro geschätzt [3].

Im Jahr 2030 soll der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung nach dem Willen der Bundesregierung bereits 65 % betragen [4].

Es ist absehbar, dass der Anteil der Erneuerbaren Energien, die aufgrund des Lastmanagements abgeregelt werden müssen, mit der angestrebten massiven Erhöhung des Anteils der Erneuerbaren Energien ohne zusätzliche Maßnahmen weiter steigen wird.

Stromspeicher, wie zum Beispiel Pumpspeicherwerke sind ein probates Mittel, den Anteil der aufgrund von Netzüberlastungen nicht nutzbaren Energieerzeugung zukünftig zu verringern.

Im regionalen Kontext trägt das Pumpspeicherwerk Forbach insbesondere angesichts des hohen Zubaupotenzials der Photovoltaik in Baden-Württemberg sowie des Rückgangs der regelbaren Erzeugung in der Region dazu bei die zunehmend intermittierende Elektrizitätserzeugung bedarfsnah zu verstetigen. Der drehzahlvariable Betrieb der Pumpturbine ermöglicht auf Schwankungen des Netzes in Sekundenschelle zu reagieren und damit die Netzstabilität zu sichern [5].

Die vorhandene Netzanbindung, die Nutzung vorhandener Anlagen und Staubecken sowie die untertägige Anordnung der neuen Anlagenteile sprechen hierbei für die besondere Eignung des Standortes Forbach.

6 Zusammenfassung

Die Planungen für die Erneuerung des Wasserkraftstandortes Forbach zeigen exemplarisch, dass das seit beinahe einhundert Jahren angewendete Konzept der Pumpspeicherung auch den gestiegenen Anforderungen der Energiewende gerecht wird.

Selbstverständlich finden dabei neueste technische Entwicklungen sowohl bei Planung und Implementierung als auch bei der technischen Ausrüstung des neuen Pumpspeicherkraftwerkes Verwendung.

Ein zeitgemäßes Anlagenkonzept minimiert die Auswirkungen auf Mensch, Umwelt und Natur und sichert die langfristige Nachhaltigkeit des Wasserkraftwerkstandortes Forbach.

Das Pumpspeicherkraftwerk Forbach ist damit bestens gerüstet, für eine der zentralen Herausforderungen der Energiewende – bedarfsgesteuerter Energiespeicherung und -bereitstellung – einen wichtigen Beitrag zu leisten.

7 Literatur

<https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/neubau-und-projekte/pumpspeicherkraftwerk-forbach/> [1]

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#statusquo> [2]

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen, Gesamtjahr und Viertes Quartal 2018, Stand 01.08.2019 [3]

Bundesregierung, Klimaschutzprogramm 2030 zur Umsetzung des Klimaschutzplanes 2050, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1> [4]

Aurora Energy Research GmbH, Energiewirtschaftliche Bewertung eines Ausbaus des Pumpspeichers Forbach, 2017 [5]

Autor:

Dipl.-Ing. Robert Achatz

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Elsenheimerstr. 11
80687 München

Tel.: +49 89 381907 93
Fax: +49 89 381907 99
E-Mail: robert.achatz@tractebel.engie.com

Überblick der Entwurf und Ausführungsplanung der 265 m hoch Steinschüttdamm mit Betonoberflächendichtung der 835 MW Dudhkoshi Speicherwasserkraftanlage in Nepal

Cesar Adolfo Alvarado Ancieta
Mohan Shakya - Shrestha Basanta

Dieser Beitrag beschreibt die Herausforderung bei dem Entwurf und Ausführungsplanung der 265 m hoch Stein-Schüttdamm mit Betonoberflächendichtung (Concrete Faced Rockfill Dam - CFRD) des Dudhkoshi-Projektes in der östlichen Entwicklungsregion Nepals. Die wichtigsten Konstruktionsmerkmale sind: Konventioneller Sockel auf einer 25 m hohen Walzbeton-Zehenwand (RCC), die auf einer 40 m tiefen Schwemmschicht auf dem Hauptflussbett bis zum rechten und linken Flussufer als Oberwasser Hauptdammfundamentmaßnahme, und damit bis zu einer tiefen Scherzone, nicht aktiven geologischer Bruch. Unterhalb der RCC-Zehenwand wurde eine Drainage- und Injektionsgalerie für Verfestigung und Injektion angeordnet, und auch eine Sekanten-Spundwand. Zusätzlich optimierte Oberwasser- und Unterwasser Dammneigungen von 1:1,45 und 1:1,8 jeweils ausgewählt wurden, basiert auf einer Dammsicherheitsanalyse nach einer Charakterisierung des Dammmaterials und geomechanischen Eigenschaften des Quarzitgesteins -innere Reibungswinkelwerte 43° bis 45° für Zonenmaterialien 3B, 3C und 3D, T und 4. Der Scherwinkel nimmt mit zunehmender Maximalgröße des gestrahlten Quarzit-Steinschüttungsmaterials ab. Gemäß der Bewertung des anisotropen Verhaltens der Quarzit-Steinschüttung wurden maximale Materialdurchmesser von 300, 450 und 600 mm ausgewählt, was bedeutet, dass die Verformung der Unterwasser-Steinschüttung einen wichtigen Einfluss auf den Spannungszustand der Betonoberflächendichtung hat. Kofferdämme und Stabilisierungsböcken-Zonen sind in den Dammkörper integriert. Der gesamte Dammvolumenkörper beträgt 30 Mio. m³.

Stichworte: Stein-Schüttdamm, Betonoberflächendichtung,
Damm-Materialanalysen, Steinreibungswinkel

1 Einführung und Hauptdammdetail

Das Dudhkoshi Speicherwasserkraftanlage Projekt befindet sich am Dudhkoshi-Fluss zwischen den Grenzen der Distrikte Okhaldhunga und Khotang in der östlichen Entwicklungsregion Nepals. Das WKA umfasst einen 265 m hoch Stein-Schüttdamm mit Betonoberflächen-dichtung (CFRD) am Dudhkoshifluss. Das Projekt verfügt zwei unterirdische Kraftwerke -600 und 200 MW Leistung-, zwei Druckstollen -13.3 km und 1 km Länge- und ein Oberflächenkraftwerk mit 35 MW Leistung am Dammfuß. Die installierte Gesamtleistung ist 835 MW. Die wichtigsten Konstruktionsmerkmale betreffen die spezielle Behandlung des Dammfundaments, das einen konventionellen Sockel auf einer 25 m hohen Walzbeton-Fußwand (RCC) umfasst, die auf einer ausgehobenen, 40 m tiefen Schwemmschicht auf dem Hauptflussbett bis zum rechten und linken Flusssufer verlegt wird. Dies ist die Hauptmaßnahme zur Gründung des Dammes flussaufwärts und damit bis zu einer tiefen Scherzone. Unterhalb der RCC-Fußwand wird eine Drainage- und Injektionsgalerie für die Verfestigung und den Injektionsverguss angeordnet. Die Anordnung des Galeriedamms bedeutet die Forderung nach einer festen Zahnkonstruktion auf der teilweise ausgehobenen Scherzone. Dieser Zahnbeton wird auf einer Betonstopfenschicht bereitgestellt, die auf den Bereich der nicht ausgehobenen Scherzone gelegt wird. Der Sockel des Zahnbetons dient als Basis für die Anordnung einer Betonleitwand in der Sohle des Galeriumsumpfes, von der eine 60 m tiefe Betonspundwand bis zum Sohlgestein realisiert wird. Durch die Betonspundwände - Sekanten-Spundwand entlang der Hauptflussbettbreite und Widerlager, am stromaufwärts gelegenen Sockel, wo der Sockel angeordnet werden muss - wird eine Vorhang Injektion durchgeführt, Abbildung 1 und 2. Die Drainage-Injektionsgalerie wird durch zwei Galerien mit den rechten und linken Widerlagern verbunden, um die Abdichtung des Dammes während Bau- und Betriebsphase zu ermöglichen. Die Konsolidierungsverpressung ist unterhalb des Galeriedamms, in der Scherzone geplant.

2 Bedingungen für geotechnische Dammgründung

Das Gebiet der Staustufe liegt in der Seti-Formation des unteren Himalayas. Hauptlithotypen sind Phyllite - duktil und neigen dazu, sich zu falten und zu

[illegible]

lang des linken und rechten Talwiderlagers vorhanden sind jeweils. Bohrungen-Kerndaten bestätigen in der Talsohle das Vorhandensein einer Scherzone - nicht aktive Störungszone -, siehe Abbildung 3.

sowie die durch Sprengungen erhaltene Gesteinsgröße, kommt zu dem Schluss, dass die Steinbruchbereiche keine Gesteine mit großen Abmessungen liefern werden, wie z.B. für Basalt, Sandstein und Kalkstein, D_{\max} -Größe für die 3B- und 3C-Materialien 1000, 600 bzw. 700 mm beträgt. Die D_{\max} -Größe von 300 bis 450 mm für die Materialien 3B und 3C definiert wurde, und unter Berücksichtigung des Verdichtungsprozesses und des Bruchindex liegen. Ein ähnlicher Fall wurde für Pakal Dul CFRD, Indien, untersucht, maximale Größe der Quarzit liegt gleich.

4 Staudamm-Zonierung, sowie Dammfundament und Dammmaterial Eigenschaften / Parameter

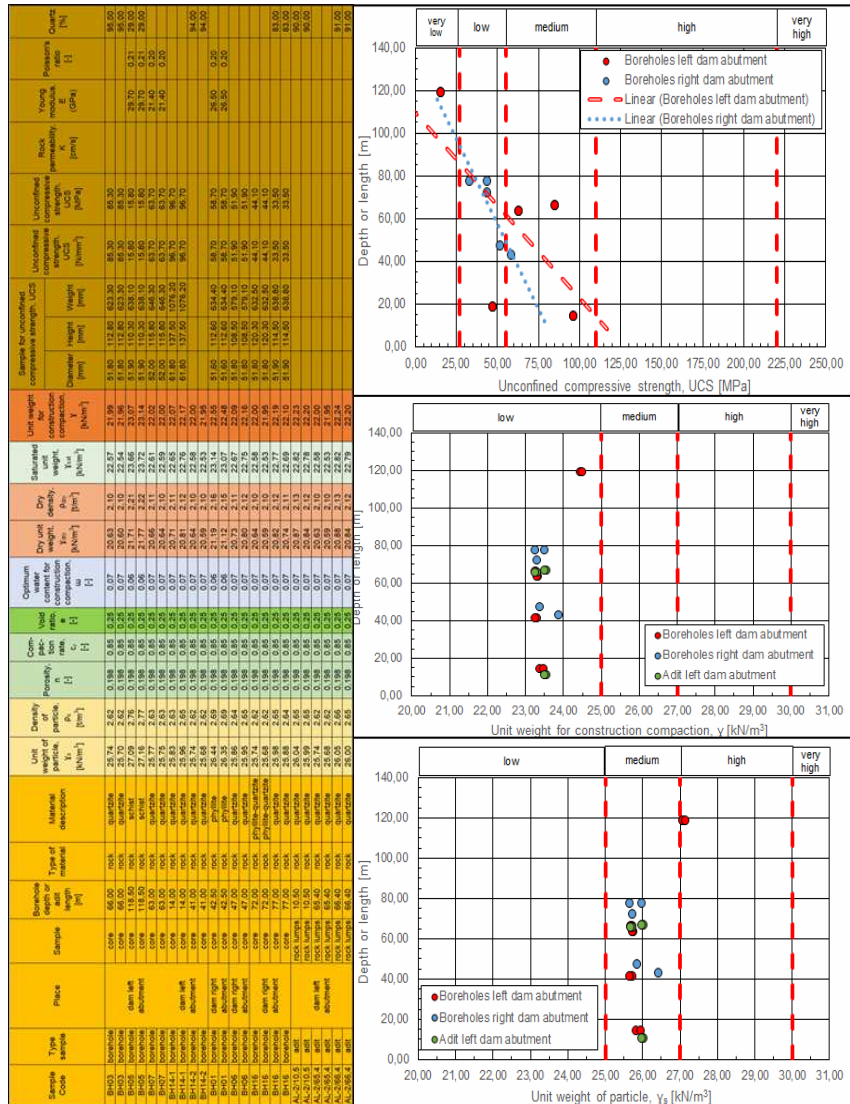
Eine geeignete Zonierung, Parameter und Abstufungskurve wurde auf der Grundlage von Testergebnissen, ICOLD-Empfehlungen und ähnlichen Erfahrungen angewendet, siehe Tabelle 2, 3 und Abbildung 5.

5 Damm-Material Charakterisierung: Bruchindex - Scherfestigkeit - interner Reibungswinkel / Dammstabilität

Die gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten des Quarzit-Steinschüttmaterials in CFRDs auf hoch seismischen Gebieten wie Pakal Dul in Pakistan, Honkanadavar (2011), Rao (2011), und triaxialen Versuchen Daten, Leps (1970), KIT (2013), Fu (2018), Vasistha (2013), für die Definition des Scherwiderstandes in einer Dammkonzeptionsphase wurden angewendet. Groß angelegte Triaxial-Versuche im Labor sollten immer die erste Wahl sein, für die Bewertung der Parameter des Materialien in verschiedenen Belastungszuständen zu testen. Vier Modellierungstechniken werden verwendet, um die Größe der Gesteinsschüttungen zu reduzieren. Die Technik der parallelen Gradierung als die besten geeignete angesehen (Ramamurthy, T. und Gupta, K.K., 1986), die für das Quarzit-Füllmaterial Pakal Dul angewandt wurde, wurden die maximalen Korngrößen für die Füllmaterialzonen 3B, 3C und 3D für den Dudhkoshi-Damm definiert. Außerdem spielt der Partikelbruch während der Prüfung eine wichtige Rolle für das Festigkeits-Verformungsverhalten von Stein-Schüttmaterial, Marsal, R.J. (1967). Steinbrüche wurden gesprengt, um geeignetes Steinmaterial für den Dudhkoshi-Damm zu erhalten. Die maximalen Korngrößen von 300, 450 und 600 mm des Prototypenmaterials für die Zonen 3B, 3C und 3D wurden für geeignet befunden und für den Einsatz im Dammkörper empfohlen. Die Werte des

Scherwiderstandswinkels des Pakal Dul getesteten Materials für diese Serien (25 mm, 50 mm und 80 mm maximale Korngrößen) betrugen $41,50^\circ$, $41,03^\circ$ und $40,12^\circ$, was eindeutig darauf hinweist, dass der Scherwiderstandswinkel mit zunehmender maximaler Korngröße des gesprengten Gesteinsmaterials abnimmt. Der Winkel des Scherwiderstandes des Prototypmaterials Pakal Dul (maximale Größe 600 mm), basierend auf parallelen Gradierung- und Extrapolationstechniken für gesprengtes Gesteinsmaterial, wurde mit $37,6^\circ$ ermittelt. Ebenso wurde der Winkel des Scherwiderstandes des Dudhkoshi-Prototypenmaterials (maximale Größe 300 mm) mit 39° festgestellt, Abbildung 7 und 8. Der Winkel des Scherwiderstandes nimmt mit zunehmender Maximalgröße des gesprengten Verfüllmaterials sowie mit dem Anstieg des Einschließungsdrucks ab. Zusammenfassend, der Bruchfaktor sowohl mit der Zunahme der maximalen Partikelgröße als auch mit dem Anstieg des Einschließungsdrucks zunimmt. Mit zunehmender Korngröße wird bei gleichem Spannungsniveau und steigendem Reibungswinkel eine größere Verzahnung erreicht. Andererseits nimmt mit zunehmender Partikelgröße die Bruchwirkung zu und der Reibungswinkel ab. Außerdem nimmt mit zunehmendem Schließdruck der Bruch zu und der Reibungswinkel wird kleiner. Der Bruchfaktor wurde für die maximale Partikelgröße von Pakal Dul 600 mm mit 21,90% und für Dudhkoshi 300 mm mit 18,60% ermittelt, Abbildung 9. Eine Empfindlichkeitsanalyse ist in Abbildung 10 dargestellt, und gibt die Basis des Bereichs des Quarzit inneren Reibungswinkels zwischen 39° und 44° , Analyse 1 an. Die Stabilitätsanalysen wurden für verschiedene Lastfälle durchgeführt und endlich Dammneigungen optimiert.

Tabelle 1: Analyse geomechanische Eigenschaften, die bei der Dammuntersuchungskampagne ermittelt wurden, Hauptautor.



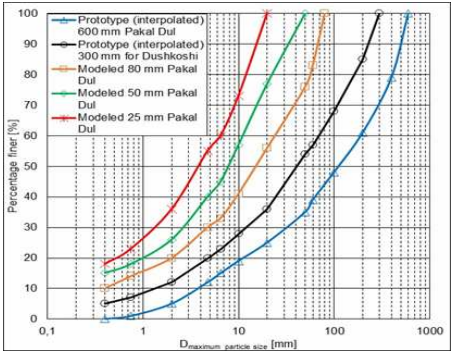


Abbildung 6: Pakal Dul und Dudhkoshi Quarzit-Prototypen Korngrößenverteilungskurven, Hauptautor.

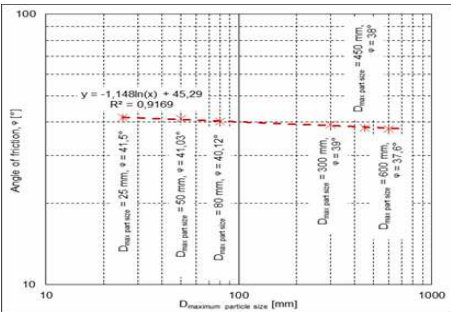


Abbildung 7: Beziehung zwischen der maximalen Partikelgröße(D_{\max}) und dem Reibungswinkel(φ) für Pakal Dul und Dudhkoshi Quarzit, Hauptautor.

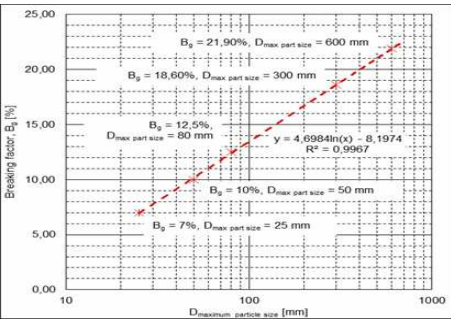


Abbildung 8: Verhältnis zwischen maximaler Partikelgröße (D_{\max}) und Bruchfaktor (B_g) für Pakal Dul und Dudhkoshi Quarzit, Hauptautor.

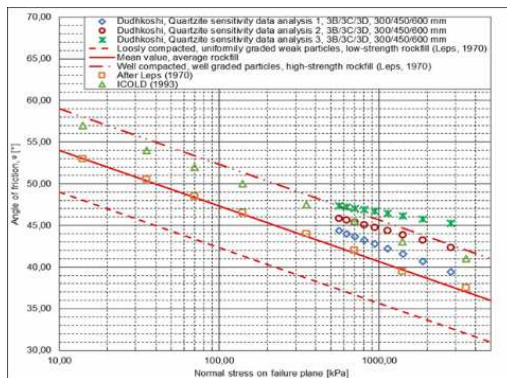


Abbildung 9: Datenzusammenstellung zur Spitzenanteilsfestigkeit von Dudhkoshi Quarzite, Sensitivitätsanalyse für 3B und 3C. Hauptautor.

6 Anisotropes Verhalten von Steinschüttungen - Planung und Konstruktion der Betonoberflächendichtung

Der Damm befindet sich in einem engen, steilen V-förmigen Tal. Die Betonplatte hat eine Fläche von 143.150 m^2 und der Talformfaktor beträgt 2,7. Unter Berücksichtigung dieses Talformfaktors sind erhöhte Bewegungen der Betonplatten zum Flussbett hin und daraus resultierende horizontale Spannungen in die zentrale Betonoberflächendichtung zu erwarten. Das Verhalten von Betonplatte steht in direktem Zusammenhang mit der Stützzone und der Verformbarkeit der Steinschüttung. Die aktualisierte Abbildung 12 des Hauptautors nach Marquez und Pinto (2005), muss als kurzer Hinweis auf potenziell ungünstige Situationen bezüglich übermäßiger Druckspannungen der Betonoberfläche verwendet werden. Abbildung 12 zeigt die Notwendigkeit eines hohen Verformungsmoduls für sehr hohe CFRD-Dämme, insbesondere in engen Tälern. Für den Fall, dass ein hohes Verformungsmodul nicht erreicht werden kann, sollten bei der Konstruktion besondere Maßnahmen getroffen werden, um hohe Druckprobleme zu vermeiden, d.h. zunehmende Längs- und Querverstärkungen, zweimalige Verstärkung der Arbeitsfugen (Antiabplatzung), zunehmende vertikale Arbeitsfugen, wie es bei Dudhkoshi CFRD berücksichtigt wurde, Abbildung 13, wo die Bauphase detailliert ist.

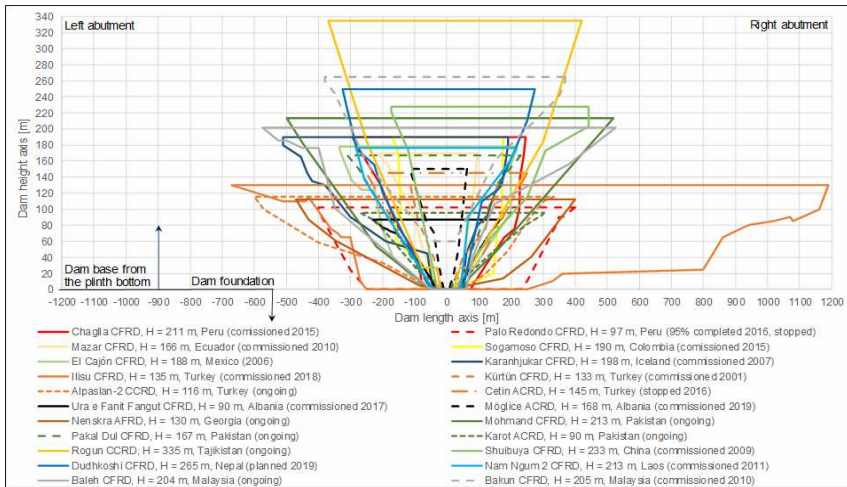


Abbildung 10: Formtalachse-vertikale Projektion für Steinschüttdämme (CFRD /ACRD/CCRD) letzten 10 Jahre, inkl. Dudhkoshi CFRD, Hauptautor.

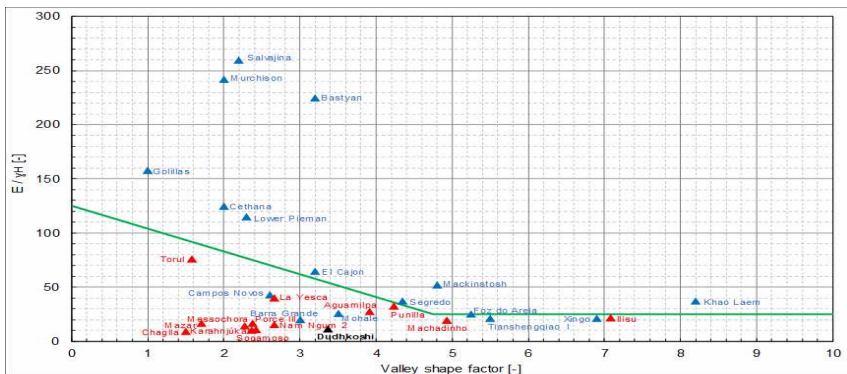


Abbildung 11: Verformungsmodul vs. Talformfaktor (nach Pinto und Marquez, 1998), aktualisiert vom Hauptautor, Daten in roter Farbe.

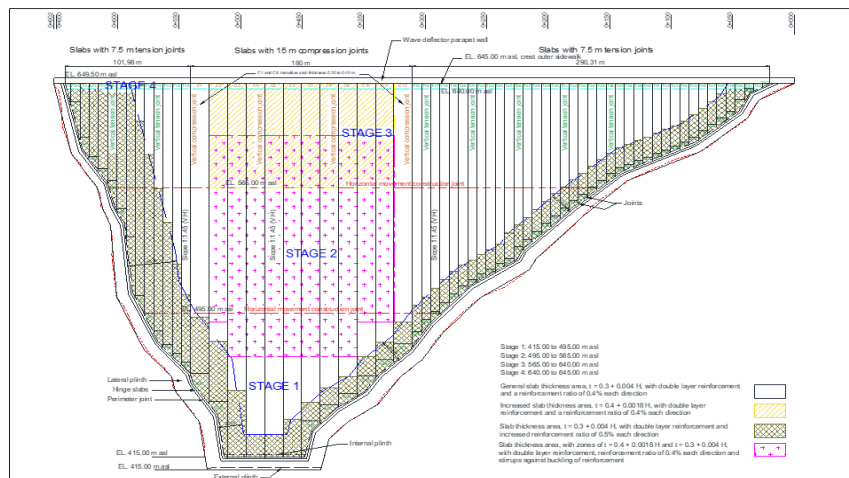


Abbildung 12: Draufsicht auf die Betonoberflächendichtung, vom Hauptautor.

Hauptautor:
Dipl.-Ing., M.Sc., M. Eng.
Cesar Adolfo Alvarado Ancieta

Nebenautoren:
B.Sc. Civil Eng. Mohan Shakya
B.Sc. Civil Eng., M.Sc. Shrestha Basanta

Teamleiter, Internat. Experte
Staudämme & Wasserkraft
Nürnberg, Prag, Lima, Kathmandu

Former NEA Deputy Director
NEA Projekt Director
Dudhkoshi Storage Hydropower Project

E-Mail: cesalv@yahoo.com

Innerstädtischer Neubau Wehrkomplex mit Kanustrecke

Gereon Hermens

Am Wehrkomplex Stiftsmühle in Lippstadt muss die sanierungsbedürftige Wehranlage neu errichtet werden, so dass die unterwasserseitige Strömung zukünftig nicht mehr wie heute für den Kanusport genutzt werden kann. Als Ersatz wird daher neben der Wehranlage u. a. eine Kanustrecke errichtet, die zukünftig für Freizeitsport aber auch für Wettkämpfe zur Verfügung stehen wird.

Stichworte: Kanustrecke, Wehrneubau, Fischaufstiegsanlage

1 Neue Kanustrecke am Wehrkomplex Stiftsmühle

Die turbulente Strömung unterhalb der Wehranlage Stiftsmühle in Lippstadt wird seit vielen Jahren von Kanusportlern und den Sportkursen des benachbarten Gymnasiums rege genutzt. Aufgrund der innerstädtischen Lage ist das sportliche Interesse an dem Standort entsprechend groß. Allerdings ist die Wehranlage in einem sehr schlechten baulichen Zustand, so dass diese, auch aus Gründen des Hochwasserschutzes, erneuert werden muss.



Abbildung 1: Turbulenter Unterwasserbereich der Wehranlage Stiftsmühle vor dem Neubau der Kanustrecke *Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH* (2013)

Der Wehrkomplex Stiftsmühle ist Teil eines größeren Flusssystems in Lippstadt. Das Abflusssystem besteht im Stadtgebiet aus der Lippe mit dem Wehrkomplex Stiftsmühle, der Nördlichen Umflut, dem Schifffahrtskanal und der Südlichen Umflut.

Die Entwicklung der Wasserläufe im Stadtgebiet hängt eng mit der historischen Entwicklung Lippstadts zusammen. Beispielsweise verlaufen die Südliche und Nördliche Umflut entlang der Linienführung ehemaliger Festungsgräben. Der Schifffahrtskanal entstand im 19. Jahrhundert, da aufgrund des Mühlenbetriebs im Stadtgebiet die Anordnung von Schleusen in der Lippe nicht möglich war.

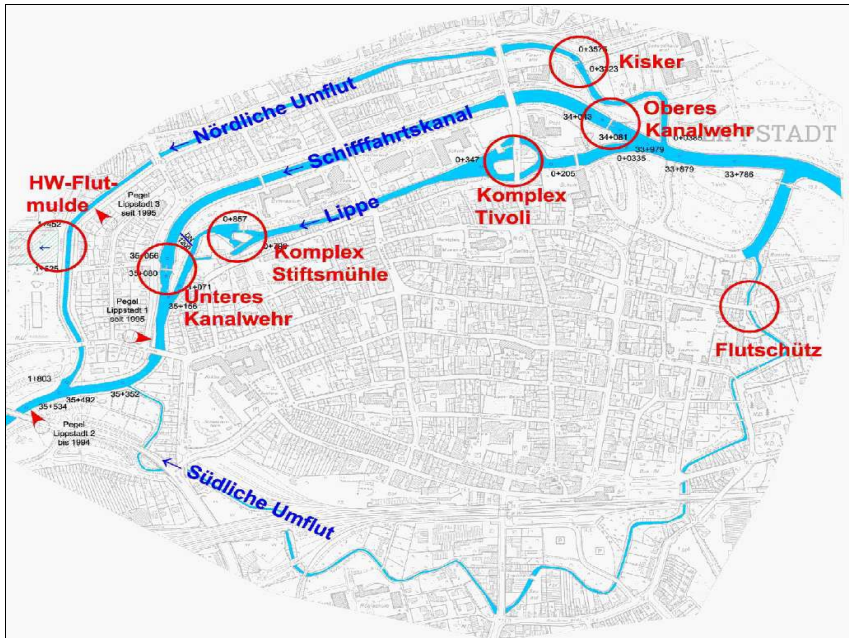


Abbildung 2: Flusssystem der Lippe in Lippstadt *Bezirksregierung Arnsberg (1998)*

Durch den geplanten Neubau des Wehrs wird auch die Energieumwandlung im Tosbecken den aktuellen Anforderungen angepasst, was dazu führt, dass die Strömungen zukünftig für den Kanusport nicht mehr attraktiv sind. Um den Kanusportlern weiterhin die Möglichkeit zur Ausübung ihres Sports zu geben, wird neben der Wehranlage eine rund 120 m lange Kanustrecke geplant, die auch für Wettkämpfe genutzt werden kann. Der Hauptabfluss wird, soweit möglich, über die Kanustrecke abgeführt, um möglichst lange Trainingszeiten zu erhalten. Kanustrecke wie Wehranlage sind für aufwandernde Fische in der Regel nicht passierbar, so dass als drittes Objekt eine Fischaufstiegsanlage mit geplant werden muss.

1.1 Die Wehranlage

Die heutige Wehranlage besteht aus einem rund 16 m breiten dreifeldrigen Schützenwehr mit jeweils 2,00 m breiten Öffnungen. Das Wehr ist seit längerem in einem sanierungsbedürftigen Zustand und nicht mehr ausreichend standsicher. Geplant ist, die Wehranlage einschließlich der seitlichen Uferbefestigungen abzubauen und durch eine einfeldrige, 12 m breite Stauklappe mit einer Höhe von 2,8 m zu ersetzen. Die Wehranlage wird in der Regel nicht

überströmt, sondern nur bei höheren Abflüssen und Hochwässern aktiviert. Die Ufermauern werden mit rückverankerten Spundwänden ausgeführt und aus städtebaulichen Aspekten anschließend mit Bruchsteinen verkleidet.

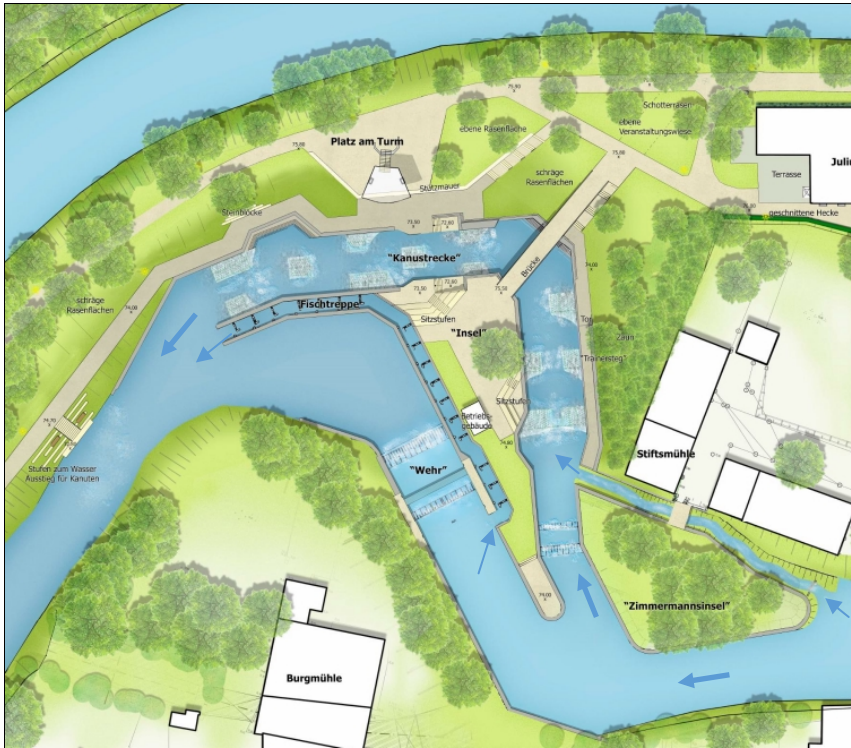


Abbildung 3: Lageplan Stadtplaner, *B.S.L. Landschaftsarchitekten* (2019)

1.2 Die Kanustrecke

Der Einlauf in die Kanustrecke wird rechts der Wehranlage angeordnet. Der Abfluss wird durch ein 7 m breites Verschlussorgan (Kanuklappe) geregelt werden, um unterschiedliche Leistungsniveaus und Schwierigkeitsgrade in der Strecke einstellen zu können. Gut trainierte KanufahrerInnen können im Oberwasser einsteigen und das Verschlussorgan als erstes Hindernis überfahren. Für weniger Geübte sind innerhalb der Kanustrecke weitere Einstiegsmöglichkeiten vorgesehen. Die Kanustrecke selbst wird 10 m breit sein und über zahlreiche Strömungshindernisse verfügen.



Abbildung 4: Beispiel einer vergleichbaren Kanustrecke *Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH (2019)*

Die Grundposition der Strömungshindernisse wird im Rahmen der Ausführungsplanung vordefiniert und während eines umfangreichen Probetriebs nachjustiert. Anschließend werden Kanusportler und Fachplaner gemeinsam testen, welche Anordnung den Vorstellungen am ehesten entspricht. Auch eine spätere Neuausrichtung der Strömungshindernisse z. B. für spezielle Wettkämpfe ist möglich. Dafür muss die Kanustrecke zuvor temporär außer Betrieb genommen und trocken gelegt werden. Durch die Einbindung des Kanusportvereins in die Planung konnten weitere für den Verein wichtige Aspekte berücksichtigt werden, wie z. B. die Einstiegstellen.

Eine komplette Trockenlegung der Kanustrecke ist nicht möglich, weil durch drückendes Grundwasser immer eine gewisse Sickerwassermenge in der Sohle der Kanustrecke verbleiben wird. Eine zunächst geplante durchgehende Bodenplatte hätte sehr stark ausgeführt werden müssen, um dem Auftriebsdruck zu widerstehen und wäre dementsprechend teuer geworden. Stattdessen wurde entschieden, die Sohle nicht durchgehend zu betonieren, sondern von Drainagefeldern zu unterbrechen und dadurch die Problematik der Auftriebssicherheit durch drückendes Grundwasser im Revisionsfall zu mindern.



Abbildung 5: Beispiel eines Strömungshindernisses Marke Omniflotts®, HYDROSTADIUM, (2017)

1.3 Die Fischaufstiegsanlage

Zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit wird zwischen Wehr und Kanustrecke eine Fischaufstiegsanlage (FAA) in Form eines Schlitzpasses mit 16 Becken installiert. In der Vorplanung waren zunächst zwei Einstiege (am Wehrfuß sowie am Ende der Kanustrecke) vorgesehen. Auch war eine aufwändige Dotationsanlage geplant, um die Leitströmung aus der FAA bei steigenden Unterwasserständen aufrecht zu halten. Auch hier überstiegen die zu erwartenden Baukosten das vorgesehene Budget.

Um auf den zweiten Einstieg am Wehr und die Dotationsanlage verzichten zu können, wurde von der Bezirksregierung Arnsberg das Abflussregime im Flusssystem in Lippstadt geändert. Während bei Niedrigabfluss auch zukünftig zunächst alle Gewässerarme mit einem Mindestabfluss versorgt werden, soll bei steigendem Abfluss zunächst nur die Kanustrecke versorgt werden. Ist hier der Ausbaudurchfluss erreicht, wird anders als heute, das überschüssige Wasser nicht über die Wehranlage Stiftsmühle abgeführt, sondern über die anderen Gewässerarme. So kann bis zu einem Abfluss von ca. Q_{315} der Abfluss über die Wehranlage vermieden werden. Fischaufstiegsanlagen sollten nach gültigem Regelwerk (DWA-M 509) für aufsteigende Fische an 300 Tagen im Jahr bis zu einem Abfluss von Q_{330} gut auffindbar sein. Somit wird

nur an für aufsteigende Fische relevanten 15 Tagen im Jahr überhaupt Wasser über die Wehranlage strömen. Der Anteil wird aber so gering sein, dass selbst dann die Fische weiterhin am gut durchströmten Ende der Kanustrecke nach einer Aufstiegsmöglichkeit suchen werden und nicht zum Wehrfuß schwimmen werden. Die Auffindbarkeit ist somit gegeben.

Auch wird zukünftig der Unterwasserstand am Auslauf der FAA durch die Abflussumleitung im Flusssystem bei Q_{330} nicht mehr so hoch sein, so dass auf die aufwändige Dotationsanlage zur Erhöhung der Leitwirkung der FAA verzichtet werden kann.

Die Turbulenzen im Mündungsbereich der Kanustrecke werden so hoch sein, dass ein Einschwimmen für die Fische meist nicht möglich sein wird. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass einzelne Exemplare schwimmstarker Fischarten den Weg durch die Kanustrecke nehmen. Auch für diese Ausnahmen soll nach Abstimmung mit Fischereiverband und Anglern eine weitere Möglichkeit zum Aufstieg am oberen Ende der Kanustrecke (Kanuklappe) vorgesehen werden (s.u.). Durch die Einbeziehung der Verbände konnten deren Bedenken und Überlegungen konstruktiv in den Planungsprozess eingebunden werden und somit eine für alle annehmbare Lösung erarbeitet werden.

1.4 Die Insel

Rechts der heutigen Wehranlage befindet sich die sogenannte Zimmermannsinsel, die durch den alten Mühlengraben zur ehemaligen Stiftsmühle entstanden ist und als privater Garten genutzt wird. Sie soll nach dem Wehrneubau weiter existieren, auch wenn sie in der Lage leicht versetzt werden muss. Daher wird zwischen der Wohnbebauung und der Insel ein kleiner Seitenbach vorgesehen, dessen geringer Abflussanteil im Oberwasser abzweigt und in die Kanustrecke eingeleitet wird. Die Ausgestaltung soll derart erfolgen, dass die schwimmstarken Fische, die den Weg durch die Kanustrecke bis zum Fuß der Kanuklappe geschafft haben, durch den Bach ins Oberwasser gelangen können.

Bei der Planung zur Ausgestaltung der Insel wurden die Anwohner und Nutzer intensiv mit einbezogen, um deren Bedenken gegenüber einer Verschlechterung berücksichtigen zu können.

2 Zusammenfassung

Mit dem Ersatzneubau des Wehres Stiftsmühle in Lippstadt ist auch der Neubau einer Kanustrecke, einer Fischaufstiegsanlage sowie die Umverlegung einer Insel erforderlich geworden. Neben den komplexen hydraulischen Fragen war auch das Zusammenführen der verschiedenen Interessen von Sportlern, Anwohnern und Stadt eine Herausforderung.

Autor:

Dipl.-Ing. (FH) Gereon Hermens
Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH
Bachstraße 62 – 64
52066 Aachen

Tel.: +49 241 565 272-34
Fax: +49 241 565 272-99
E-Mail: gereon.hermens@floecksmuehle-fwt.de

Hubbrückenensemble Lübeck – Denkmalschutz und digitale Planungsverfahren

Tobias Schaulat
Rüdiger Richter

Das Hubbrückenensemble in Lübeck, bestehend aus drei Brücken, wurde mit der Inbetriebnahme des Elbe-Lübeck-Kanals im Jahr 1900 durch Kaiser Wilhelm II eingeweiht. Die Brücken verbinden die Vorstadt Lübecks im Norden mit dem Stadtzentrum im Süden. Zwei der Brücken sind beweglich als Hubbrücken und eine als feststehende Fußgängerbrücke ausgeführt. Angetrieben werden die Hubbrücken mit einer über 117 Jahre alten Wasserhydraulik.

1 Instandsetzung nach über 117 Jahren Betriebszeit

Ursprünglich ab dem Jahr 1900 genutzt als Verkehrsknotenpunkt für den Rad-, Fußgänger-, Pferdefuhrwerk- und Eisenbahnverkehr, später dann LKW- und PKW- und Eisenbahnverkehr beinhaltet der Hubmechanismus der zwei Hubbrücken einen außergewöhnlichen Hubmechanismus, die Wasserhydraulik.

Mittels Gegengewichte und Gleichstromtechnik heben riesige Hubzylinder jeweils die Straßen- und Eisenbahnhubbrücke (42,24 m und 45,00 m Spannweite, ca. 250 t je Brücke) um ca. 3,00 m an. Diese Hubhöhe ist für die Gewährleistung der Durchfahrtshöhe von 5,25 m für den Schiffsverkehr auf dem Elbe-Lübeck-Kanal erforderlich. Im Westen des Ensembles befindet sich die feststehende Fußgängerbrücke (ca. 42,24 m Spannweite), welche gleichzeitig als Leitungsbrücke für Versorgungsleitungen der Wasserhydraulik und der Telekommunikation dient.

Innerhalb der letzten 50 Jahren fanden mehrere größere und kleinere Instandsetzungsarbeiten teilweise durch Schweißen in anspruchsvollen und hochausgelasteten Teilbereichen der Bauwerke an nicht schweißgeeignetem Material (Flusseisen) statt. Im Zuge einer Havarie im Jahr 2009, bei der umfangreiche Schäden im Antriebsstrang der Eisenbahnbrücke entstanden sind, wurde die Eisenbahnbrücke ihrer Funktion entwidmet und permanent in angehobener Stellung abgesetzt.

Das Ensemble gehört aufgrund seiner Lage zum erweiterten Bereich des Weltkulturerbes der Hansestadt Lübeck und ist somit ein historisch bedeutendes Bauwerk der Stadt Lübeck. Auf der Basis dieses historischen Stellenwertes nehmen die Anforderungen an die Aufnahme des Bestandsbauwerkes, sowie an die Planung der Instandsetzung bzw. Sanierung des Ensembles einen hohen nationalen und internationalen Stellenwert ein.



Abbildung 1: Ansicht von Westen des Hubbrückenensembles Hansestadt Lübeck

2 Planungsauftrag

2.1 Zustandsfeststellung/Bestandsaufnahme

Im Rahmen eines Planungsauftrages wurde für das gesamte Ensemble (Stahlüberbauten, Maschinentechnik, Widerlager, Brückentürme, elektrische Anlagenteile) eine Zustandsfeststellung erstellt. Diese Zustandsfeststellung basiert auf einer detaillierten Begutachtung des Stahlbaus (Brückenprüfung nach DIN 1076 als erweiterte Hauptprüfung), der Bauwerksprüfung der übrigen Anlagenteile der Kreuzungsanlage, der maschinentechnischen und elektrotechnischen Anlagenteilen, sowie auf der Bewertung der Anlage nach Maschinenrichtlinie, sowie die Beurteilung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes.

Die Auswertung dieser Zustandsfeststellung beeinflusst die folgenden Planungsschritte im Rahmen einer Vorplanung zu Instandsetzungs-, Sanierungsmaßnahmen und Neubauvarianten.

Zur Aufnahme des Bestandes wurde das komplette Ensemble durch das Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg mittels Laserscan Technik aufgenommen (3D Vermessung). Mit über 60 Fixpunkten (Targets) wurden neben den Überbauten, auch die Maschinentechnik, die Widerlager und die Katakommen der Brückenanlage gescannt.

2.2 Reale Abbildung mittels 3D-Scan

Ziele der digitalen Bestandsaufnahme sind die generelle Erfassung der drei Brücken, die Erstellung eines 3D Modells für die weiteren Planungsschritte und die Erstellung eines „*Building-Information-Modeling*“-Modells (BIM-Modell). Neben der Recherche und Erfassung der Bestandsunterlagen sind durch das Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg grundlegende Arbeiten für die Erstellung eines vollständigen 3D-Scans erforderlich gewesen. Zur Erfassung der Brücken sind zunächst Grundlagennetze für die Lage und die Höhe mit einer Genauigkeit von ± 1 mm gemessen worden. Weiterhin wurde das Bauwerk mit 68 Magnetfüßen vermarktet (Innen- und Außenbereiche) zur Georeferenzierung der späteren Einzelscans. Die Referenzierung erfolgte anschließend mit der genauen Bestimmung der Scans über Zielkugeln bzw. Prismen, die auf die Magnetfüße gesetzt worden.



Abbildung 2: Links: Vermarktung mit Magnetfuß und Zielkugel im Widerlagerbereich; rechts: Scan des Brückenturms innen und außen

Nach erfolgreicher Herstellung der Zielmarken, Festlegung des Messprogramms (Ablauf der Messung, Standpunkte des Laserscanners, Festlegung der Auswertungssoftware, das Auswertungskonzept) erfolgte die Durchführung der Messung. Hierbei wurde eine klassische Tachymetrie für den Lageplan und für den Bereich rund um das Bauwerk mit einer Genauigkeit von $\pm 1 - 2$ mm durchgeführt. Mittels Terrestrischem Laserscanning wurden an 100 Standpunkten alle Bauwerksteile im Innen- und Außenbereich erfasst (Genauigkeit $\pm 0,002$ m relativ und $\pm 0,003$ m absolut). Die Oberkanten der Widerlager wurden hingegen mit einer Totalstation gescannt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Ausschnitte aus den gescannten und nachträglich bearbeiteten Bereichen.

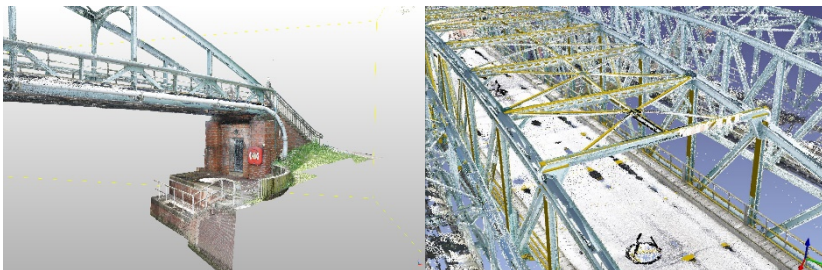


Abbildung 3: links: Scann Fußgängerbrücke Überbau und Widerlager Nordufer; rechts: Bestimmung und Festlegung der Stahlprofile aus den Scan-Daten

2.3 Modellbildung

Im Rahmen der Verarbeitung der Vermessungsdaten und anhand der zur Verfügung stehenden Bestandsunterlagen wurde ein 3D-Modell durch das Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg entwickelt, welches die Basis für die weiteren Planungsschritte darstellt.

Bereits in Leistungsphase 2 der HOAI ist dieses Modell des Hubbrückenensembles als Modell zu verwenden. Ziel ist es, die weiterführenden Planungsschritte im Zusammenspiel aller Beteiligten (Architekt, Planer, Bauherr und Bauunternehmen) durchzuführen. So können bereits in der Entwurfsphase physische und funktionale Eigenschaften innerhalb des digitalen 3D-Modells hinterlegt werden.



Abbildung 4: 3D-Modell Hubbrückenensemble resultierend aus der Verarbeitung der Scan-Dateien

Das vorliegende digitale 3D Modell beinhaltet das Ergebnis der Vorplanung und wird im Rahmen der weiterführenden Planungsschritte detailliert.

3 Ausblick

Die Planung zur Instandhaltung bzw. Sanierung des Hubbrückenensembles wird vom Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg als Pilotprojekt für das gewerkeübergreifende Arbeiten (BIM) angesehen.

Das erstellte Modell ist bereits im Rahmen der Voruntersuchung für die Darstellung der Planungsvarianten genutzt worden. Im weiteren Projektablauf soll das Modell zum vollwertigen 3D BIM-Modell entwickelt werden. Für das WNA Magdeburg stehen hierbei die Anwendungsfälle Visualisierung, Entwurfsplanung, Koordinierung der Gewerke, Bauablaufplanung, Mengenermittlung, Ausschreibung und Bauwerksdokumentation im Vordergrund. Es ist beabsichtigt an dem Hubbrückenensemble die Möglichkeiten Entwurfsaufstellung und die Fortschreibung des Entwurfes in der Bauausführung mittels der BIM-Methodik unter Einbeziehung weiterer elektronischer Verfahren wie z.B. die elektronische Aktenablage, elektronische Rechnung, elektronische Entsorgungsnachweise usw. in der Praxis hinsichtlich der Abläufe der Hard- und Software zu testen.

Die mit dem Projekt gemachten Erfahrungen hinsichtlich der Organisation der Abläufe und des Einsatzes der Soft- und Hardware sowie des Arbeitens der einzelnen Gewerke in einem virtuellen Gesamtmodell ist ein kleiner Schritt im digitalen Wandel. Die gemachten Erfahrungen gehen in die zukünftigen Projekte des Wasserstraßen-Neubauamtes Magdeburg ein.

Aus derzeitiger Sicht liegt der Schwerpunkt auf die effizientere Gestaltung der Planungs- und Bauprozesse.

4 Literatur

- Ingenieursgemeinschaft Hubbrückenensemble (2019): Modernisierung des Hubbrückenensembles in Lübeck, Henstedt-Ulzburg 2019
- Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg (2019): Erfahrungsbericht Bestandserfassung 3d Scanning, Magdeburg 2019

Autoren:

Tobias Schaulat, M.Sc.

Tractebel Hydroprojekt GmbH
GB Spezialbau Engineering
Schleinufer 16
39104 Magdeburg

Tel.: +49 391 744 886 24
Fax: +49 391 744 886 30
E-Mail: Tobias.Schaulat@
tractebel.engie.com

Dipl.-Ing. Rüdiger Richter

Wasserstraßen-Neubauamt
Magdeburg
Kleiner Werder 5c
39114 Magdeburg

Tel.: +49 391 535 2250
Fax: +49 391 535 2214
E-Mail: Rüdiger.Richter@
wsv.bund.de

Kunststoffe und Umwelt: Neue Herausforderungen an Geokunststoffe

Dr.-Ing. Helge Hoyme
Dr.-Ing. Lars Vollmert

Geokunststoffe finden bereits seit Jahrzehnten Anwendung in den unterschiedlichsten Bereichen der Bauindustrie. Insbesondere wenn es darum geht den ökologischen Fußabdruck, z.B. gemessen an der Emission von CO₂, zu bewerten, hat ein ersatzweiser Einsatz von Geokunststoffen oft große Vorteile. Auf der anderen Seite sind jedoch auch Bedenken gegen den Einsatz von Kunststoff in der Bauindustrie in der Tendenz zunehmend und zu berücksichtigen. Eine mögliche Alternative ist es, Geokunststoffe aus biologisch abbaubaren Rohstoffen zu designen, welche sich nach Ihrer geplanten Zeit der Nutzung biologisch abbauen können.

Stichworte: Geokunststoffe, biologisch, abbaubar, Mikroplastik

1 Einleitung

Der Klimawandel, die Notwendigkeit zur Reduzierung von CO₂-Emissionen, Plastik im Meer und viele weitere Themen mit einem Bezug zur Ökologie sind nicht erst seit dem starken Auftreten der Jugendbewegung „Fridays for Future“ in aller Munde und nahezu jedem Bürger präsent. Doch was hat dies mit dem speziellen Bereich der Geokunststoffe in der Bauindustrie und hier im Schwerpunkt mit dem Wasserbau zu tun?

Zunächst bestehen Geokunststoffe, wie der Name bereits impliziert, im Regelfall aus Kunststoff welcher aus fossilen Rohstoffen wie Erdöl hergestellt wird. Geokunststoffe finden bereits seit vielen Jahrzehnten Anwendung in den unterschiedlichsten Bereichen der Bauindustrie. Besonders häufig werden sie aufgrund ihrer technischen Vorteile in den Bereichen Infrastruktur und im Wasserbau genutzt. Mögliche Anwendungen sind auf dem Festland z.B. im Straßen- und Wegebau, an der Küste z. B. als Filtervliesstoff unter Deckwerken, sowie im Off-Shore Bereich z.B. als Sandcontainer für den Kolk-

schutz an festen Konstruktionen, Stand der Technik. Geokunststoffe haben je nach Anwendung unterschiedliche Funktionen, wie Dränen, Filtern, Schützen, Verpacken, Bewehren oder Kombinationen daraus. In manchen Anwendungsgebieten ergänzen sie herkömmliche Bauweisen, in anderen ersetzen sie diese und generieren einen hohen Nutzen für den Bauherrn oder aus planerischen Gesichtspunkten. Vorteile ergeben sich aber auch insbesondere für die Ökologie, wenn man zum Beispiel den CO₂-Verbrauch einer klassischen geotechnischen Lösung aus überwiegend mineralischen Baustoffen mit einer Bauweise mit Geokunststoffen vergleicht. Ökonomisch sind Lösungen mit Geokunststoffen gegenüber den klassischen Lösungen mit oft hohem Materialeinsatz überwiegend im Vorteil.

Über die vergangenen Jahrzehnte fanden die Geokunststoffe Einzug in zahlreiche Regelwerke. Zumeist wird hier der Schwerpunkt auf Langlebigkeit und Reinheit der Rohstoffe (1A-Qualität) gelegt, wodurch es heute nur noch in Ausnahmefällen möglich ist recycelte Werkstoffe zum Einsatz zu bringen.

Lösungen mit Geokunststoffen weisen unbestreitbare Vorteile gegenüber klassischen Lösungen auf.

2 Klassische Geokunststoffe

2.1 Ökologischer Fußabdruck

Insbesondere wenn es darum geht den ökologischen Fußabdruck, z.B. gemessen an der Emission von CO₂, zu bewerten, hat ein ersatzweiser Einsatz von Geokunststoffen oft große Vorteile. In zurückliegenden Jahren wurden einige vergleichende Lebenszyklusanalysen (LCA) mit unterschiedlichen Bauverfahren an Projektbeispielen durchgeführt. Beispielhaft sei hier ein Vergleich zwischen einer Bodenstabilisierung mit Feinkalk gegenüber einer Lösung mit Geogittern am Beispiel der Kreisstraße K34 bei Würselen (Landkreis Aachen) (2009) (2013) vorgestellt.

Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 1, zeigen eine deutliche Einsparung des Treibhausgases CO₂ bei Einsatz eines Geogitters anstelle des Einsatzes einer klassischen Bodenverbesserung unter Einsatz von Feinkalk. Selbstverständlich kann ein solches Ergebnis nicht pauschalisiert für alle Projekte werden, es kommt immer auf den Einzelfall und auf die jeweils vorhandenen Randbedingungen an. Jedoch sind in der überwiegenden Zahl von untersuchten Projektbeispielen die Lösungen unter Einsatz von Geokunststoffen in der Größenordnung von rd. einer Zehnerpotenz im Vorteil gegenüber den klassischen Verfahren.

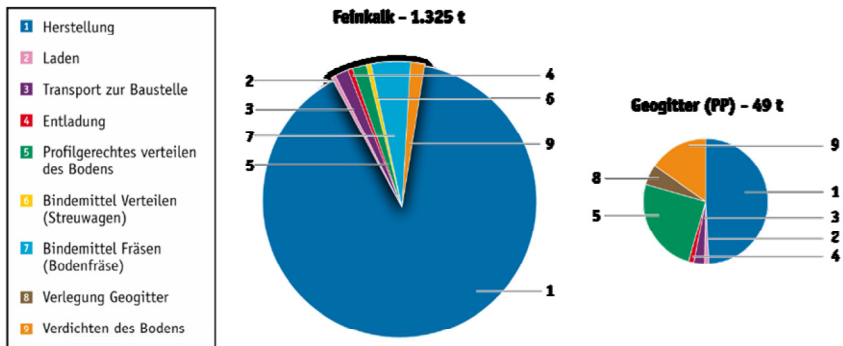


Abbildung 1: Kumulierte CO₂ Emissionen beim Einsatz hydraulischer Bindemittel bei der Bodenstabilisierung im Vergleich zum Einsatz von Geogittern am Beispiel des Neubaus der Kreisstraße K34, Kreis Aachen, 2008

2.2 Dauerhaftigkeit

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Langlebigkeit von Geokunststoffen. In der öffentlichen Wahrnehmung ist Kunststoff als Abfall dem Kunststoff als Produkt oft gleichgesetzt. Es ist jedoch heute unmöglich auf Kunststoff zu verzichten, als Beispiele seien hier nur ihr Einsatz in Verkehrsmitteln, im Wohnbereich oder in der Medizintechnik genannt. Was jedoch verbessert werden kann ist unser Umgang mit den Produkten nach dem Ende ihrer Lebenszeit. Ein korrektes Recycling und ein damit einher gehender geschlossener Stoffkreislauf sind sicherlich wünschenswert aber auch heutzutage noch nur in Teilbereichen umgesetzt. Auch Geokunststoffe sollten nach ihrem Einsatz vollständig rückbaubar und verwertbar sein. Zu dieser Thematik finden aktuell Forschungen statt aus denen praktikable und effiziente Lösungen abgeleitet werden sollen.

2.3 Direkter Einfluss auf die Umwelt

Ein Einsatz von Geokunststoffen ist oft so ausgelegt, dass durch die vollständige Umschließung mit mineralischen Baustoffen kein Abrieb oder auf andere Art bedingter ungewollter Eintritt von Kunststoff in die Umwelt bis zum Ende der gewünschten Lebensdauer auftreten kann. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz als Betonstraßenvliesstoff. Der Vliesstoff liegt hier eingekapselt zwischen den unterschiedlichen Betonschichten und wird erst wieder bei Rückbau der Fahrbahn frei gelegt. Während der Dauer seines Einsatzes erhöht er aber die Lebensdauer der Straße signifikant.



Abbildung 2: Betonstraßentrennvliesstoff, vollständig gekapselt in der Betriebsphase

Es gibt jedoch auch Einsatzzwecke bei denen der Geokunststoff in direktem Kontakt mit Umwelteinflüssen steht, wie z.B. bei Deckwerken, Küstenschutzmaßnahmen oder im Bereich des Kolksschutzes. Produkte, die für diese Einsatzzwecke entwickelt wurden, haben eine vorab definierte Lebensdauer zu erreichen. In dieser Zeit soll so wenig wie möglich oder im Idealfall gar kein Kunststoff als Abrieb oder sonstiger Verlust in die Umwelt gelangen. Da ein Eintrag von Kunststoff in die Umwelt jedoch nicht mit zu 100-prozentiger Sicherheit in allen Fällen ausgeschlossen werden kann, ist in manchen Anwendungen und Märkten eine steigende Tendenz zum Rückgreifen auf alternative und somit oft herkömmliche Bauweisen durch Behörden oder private Auftraggeber zu verzeichnen, wodurch jedoch die Vorteile, die ein Einsatz von Geokunststoffe in ökologischer aber auch in ökonomischer Sicht bieten, wiederum verloren gehen.



Abbildung 3: Filtrervliesstoff in direktem Kontakt zur Umwelt, auch während der Betriebsphase

3 Biologisch abbaubare Geokunststoffe

Eine Alternative sind Geokunststoffe aus biologisch abbaubaren Rohstoffen, welche sich nach Ihrer geplanten Zeit der Nutzung biologisch abbauen. Weitere Anwendungen können einen Abbauvorgang über die Zeit erfordern, zum Beispiel Produkte für den Erosionsschutz. Den biologisch abbaubaren Produkten gemein ist die Eigenschaft, dass auch ein ungewollter Eintritt in die Umwelt, zum Beispiel aus Abrieb oder Beschädigung, zu keinerlei Schädigungen an Flora und Fauna führt. Trotzdem erreichen sie, bei auf die jeweiligen Projektanforderungen abgestimmtem Design, die für den Anwendungsfall notwendige Lebensdauer und erfüllen während dieser Zeit ihre Funktion.

Um dieses Ziel zu erreichen wurden umfangreiche Versuche mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Die besten Ergebnisse hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitiger biologischer Abbaubarkeit konnten mit industriell hergestellten Stapelfasern erzielt werden. Die zum Einsatz kommenden Fasern werden aus 100-prozentig nachwachsenden Rohstoffen produziert. Zu beachten ist, dass die Rohstoffe zur Herstellung der Fasern aus ausschließlich zertifizierten Quellen stammen dürfen. Bei der Produktion der Fasern wird insbesondere Wert auf das Recycling des Prozesswassers gelegt. Ein weiterer Vorteil des zum Einsatz kommenden Rohstoffs ist, dass der Wasserverbrauch bei der Herstellung zum Beispiel im Vergleich zur Herstellung von Baumwollfasern um ca. 95% geringer ausfällt. Durch die industrielle Herstellung der Fasern, vergleichbar mit der Herstellung von Kunststofffasern aus fossilen Brennstoffen, kann eine gleichbleibende und hohe Qualität, anders als bei Naturfasern wie z.B. Flachs, Jute oder Kokos, erzielt werden.



Abbildung 4: Stapelfasern als Rohstoff für das zu 100-prozent biologisch abbaubare Geotextil Secutex® Green

3.1 Anwendungen

In vielen Anwendungen ist keine dauerhafte Wahrung der Produkteigenschaften notwendig. So kann für Filteranwendungen durchaus in Kauf genommen werden, dass eine für den Einbau wichtige Zugfestigkeit im eingebauten Zustand abnimmt. In anderen Fällen wird sogar angestrebt, dass sich Produkteigenschaften zeitlich verzögert verändern. Darüber hinaus gibt es Anwendungen, in denen die Bedingungen für einen biologischen Abbau praktisch nicht gegeben sind. Beispiele für die genannten Kriterien finden sich bei Anwendungen in den folgenden Bereichen:

- ◁ Trenn-, Filter- und Schutzlagen,
- ◁ Garten- und Landschaftsbau,
- ◁ temporärer Wege- und Straßenbau,
- ◁ Wege- und Straßenbau in besonders sensiblen Gebieten wie in FFH, in alpinen Räumen, bei Ausgleichsmaßnahmen, in Wasserschutzgebieten, etc.,
- ◁ Ufersicherung an Gewässern / naturnaher Gewässerausbau,
- ◁ Schutzlagen an Uferbereichen von Gewässern, als Dünen- und Küstenschutz,
- ◁ Sandcontainer als Kolkschutz / Uferschutz / künstliches Riff,
- ◁ Strandweg und Sandfangzaun.

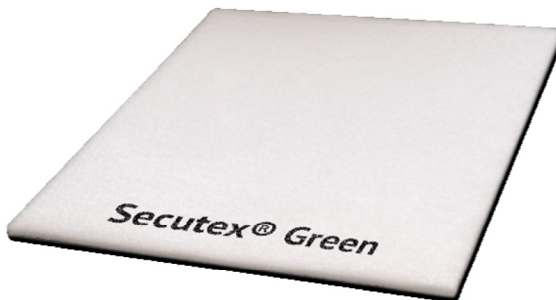


Abbildung 5: Der in Ansicht und Haptik dem klassischen Vliesstoff zum Verwechseln ähnliche neuentwickelte geotextile Vliesstoff

3.2 Geotextilrobustheitsklassen

Aufgrund der den klassischen Vliesstoffen ähnlichen Eigenschaften und der stets gleichbleibenden Qualität der Fasern und des produzierten Vliesstoffs kann eine Einteilung des neuen biologisch abbaubaren Geotextils in Geotextilrobustheitsklassen vorgenommen werden. Diese Einteilung bezieht sich auf die Eigenschaften Grammaturn und Stempeldurchdruckkraft, die auch für den

klassischen Vliesstoff aus Kunststoff maßgeblich sind. Die charakteristische Öffnungsweite ändert sich im Verlauf der Lebensdauer eines auf rein organischem Rohstoff basierenden Vliesstoffs. Nach der Produktion, im noch trockenen Zustand wird der Test durchgeführt. Durch Zugabe von Wasser und die damit verbundene Aufnahme von Feuchtigkeit bei einem organischen Stoff, durch Trockenperioden und je nach Randbedingung einsetzender Abbau des Produktes unterliegt die Öffnungsweite naturgemäß gewissen Schwankungen.

Tabelle 1: Geotextilrobustheitsklassen multifunktionaler Trenn- und Filtervliesstoffe in biologisch abbaubarer Variante - Beispiel

	[GRK 2]	GRK 3	GRK 4	GRK 5
Grammatur	300 g/m ²	400 g/m ²	600 g/m ²	900 g/m ²
Schichtdicke	3,0 mm	3,3 mm	4,0 mm	4,5 mm
Stempeldurchdruckkraft	≥1.000 N	≥1.500 N	≥2.500 N	≥3.500 N

3.3 Zertifizierungen

Es gibt international eine große Auswahl an Zertifizierungen für unterschiedlichste Eigenschaften von Produkten. Die Eigenschaft „biologische Abbaubarkeit“ ist mittlerweile recht gut standardisiert, es gibt unterschiedliche Labels, die jedoch zumeist auf den Ergebnissen von ähnlichen, untereinander vergleichbaren oder gar identischen Prüfungen basieren.

Eine oft gescholtene Eigenschaft von biologisch abbaubaren Produkten ist, dass diese sich nur unter hohen Temperaturen zersetzen können. Dies führt in vielen Fällen dazu, dass die eigentlich biologisch abbaubaren Produkte in den Verwertungsanlagen aussortiert werden müssen und dann doch der Verbrennung zugeführt werden. Der in diesem Beitrag vorgestellte Vliesstoff aus nachwachsendem organischem Rohstoff erfüllt die Anforderungen gemäß den europäischen Normen in Bezug auf die industrielle Kompostierbarkeit und insbesondere auch in Bezug auf die Kompostierbarkeit in häuslichem Kompost, so dass einer Verwertung des Vliesstoffs nach einem Rückbau nichts im Wege steht. Schwerpunkt der angestrebten biologischen Abbaubarkeit ist allerdings nicht die Kompostierbarkeit, sondern die erweiterte Umweltunbedenklichkeit in Anwendungen, bei denen eine Freisetzung durch Abrieb nicht wie in den meisten herkömmlichen Anwendungen konstruktiv ausgeschlossen werden kann.

3.4 Fortgesetzte begleitete Untersuchungen

Aktuell laufen weitere Forschungen mit unterschiedlichen alternativen Rohstoffen zu deren Verarbeitbarkeit, Dauerhaftigkeit, biologischen Abbaubarkeit und Verstoffwechselbarkeit.

Die Dauerhaftigkeit biologischer Materialien hängt in maßgeblicher Weise von den Randbedingungen ab denen sie während der Dauer ihres Einsatzes ausgesetzt sind. Als Einflussfaktoren auf die Langlebigkeit biologisch abbaubarer Materialien sind insbesondere die Umgebungstemperatur, die Feuchtigkeit und die biologische Aktivität zu nennen. Langjährige Versuchsreihen mit unterschiedlichen Rohstoffen, Grammaturen und Umgebungsrandbedingungen wie Art der Böden, Temperatur und Feuchte sind hierzu in Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Einrichtungen geplant worden und befinden sich derzeit in der Umsetzung.

Eine weitere Eigenschaft von Materialien ist die sogenannte Metabolisierbarkeit oder Verstoffwechselbarkeit. Sie beschreibt die Umsetzung von Materialien in Körpern unterschiedlicher Lebewesen zunächst zu Zwischenprodukten, den Metaboliten. Weitergehende Stoffwechselvorgänge bestehen aus vielen einzelnen Serien enzymatischer Umsetzungen, die spezifische Produkte liefern und die wiederum weiter abgebaut werden.

In Bezug auf die Vliesstoffe in der Geotechnik ist dies besonders im Kontext Wasserbau von Interesse. Bei einem Einsatz von Vliesstoffen kann es unbestritten zu Beschädigungen bei Einbau, Betrieb und Rückbau von Materialien kommen. Besteht der Vliesstoff nun aus verdaulichem Material wird er aller Voraussicht nach nicht zu Schädigungen an Lebewesen beitragen, eventuell freigesetzte Fasern oder Vliesstoffreste bleiben somit ungefährlich für Flora und Fauna. Zu diesem Themenkomplex laufen wissenschaftlich begleitete Untersuchungen deren erste Ergebnisse hier auszugsweise vorgestellt werden. Die Abbildung 6 zeigt eine Aufnahme eines Vliesstoffs mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) nach Inkubation mit bestimmten Inhaltsstoffen der Magensäure von aquatischen Lebewesen. Die Fasern zeigen einen deutlichen Angriff durch Enzyme an der Faseroberfläche. Dies deutet deutlich auf die Abbaubarkeit der organischen Fasern z.B. in den Mägen von Meerestieren hin.

Weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Verstoffwechselbarkeit unterschiedlicher Rohstoffe durch aquatische Lebewesen befinden sich aktuell in der Umsetzung. Untersuchungen zur mikrobiellen Verstoffwechselbarkeit des reinen Produkts ohne Umgebungsstoffe, also anders als Tests zur

biologischen Abbaubarkeit in Böden oder Kompost, sind ebenfalls für das erste Quartal 2020 geplant.

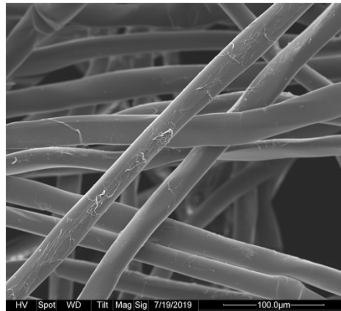


Abbildung 6: Aufnahme von durch Enzyme angegriffene Fasern eines biologisch abbaubaren Geotextils mit einem Rasterelektronenmikroskop, 100 μm 0,1 mm

4 Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt die Vorteile beim Einsatz von Geokunststoffen im Vergleich zu klassischen Bauweisen mit rein mineralischen Baustoffen. An einem Beispiel wird die Reduzierung des CO_2 -Verbrauchs bei Einsatz von modernen Geokunststofflösungen deutlich.

Es gibt Fragestellungen im Tiefbauingenieurwesen bei denen es nicht auf eine den Kunststoffen innewohnende extrem lange Dauerhaftigkeit ankommt. Für diese Fragestellungen kann es sinnvoll sein einen biologisch abbaubaren Vliesstoff einzusetzen. Dieser hat in den meisten Anwendungsfällen eine ausreichende Dauerhaftigkeit, da in dem überwiegenden Teil solcher Einsätze die Randbedingungen im Hinblick auf Temperatur und umgebende biologische Aktivität so niedrig sind, dass keine unmittelbare Zersetzung des grundsätzlich biologisch abbaubaren Produkts einsetzt. Insbesondere bei Anwendungen, die eine temporäre (wenn auch durchaus langfristige) Funktion erfordern, oder bei Anwendungen, in denen ein Abrieb konstruktiv nicht ausgeschlossen werden kann, stellt diese neue Produktgruppe eine erweiterte Möglichkeit zur Anwendung von Geokunststoffen da.

5 Literatur

Egloffstein, T. (2009): Bauverfahren mit mineralischen Baustoffen und Bindemitteln im ökologischen Vergleich mit dem Einsatz von Geokunststoffen. 6. Geokunststoff-Kolloquium der NAUE GmbH & Co. KG
Frischknecht, R., Büsser-Knöpfel S., Itten R., Stucki M., Wallbaum H., (2013): Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics versus Conventional filter layer. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013.

Autoren:

Dr.-Ing. Helge Hoyme

Dr.-Ing. Lars Vollmert

NAUE GmbH & Co. KG

Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co.
KG

Gewerbestr. 2
32339 Espelkamp

Gewerbestr. 2
32339 Espelkamp

Tel.: +49 5743 93205 48
Fax: +49 5743 93205 66
E-Mail: hhoyme@naue.com

Tel.: +49 5743 93205 64
Fax: +49 5743 93205 66
E-Mail: lvollmert@bbgeo.com

Digitalisierung im Verkehrswasserbau: Aktuelle Entwicklungen

Daniela Schenk
Charlotte Laursen

Die Planung von Bauwerken effizienter zu gestalten, die Prüf- und Genehmigungsprozessen zu beschleunigen sowie die Infrastruktur wirtschaftlicher zu betreiben und zu unterhalten, sind die vordringlichen Ziele und die zentralen Herausforderungen der Digitalisierung im Verkehrswasserbau. Um eine nachhaltige digitale Entwicklung zu schaffen, können und müssen verschiedene Schritte gegangen werden. Der vorliegende Beitrag richtet seinen Blick auf aktuelle Entwicklungen der Bundesanstalt für Wasserbau und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, welche aktuell im Rahmen verschiedener Projekte die Digitalisierung im Verkehrswasserbau stärken.

Stichworte: Digitales Objektkataster, Datenvernetzung, Projektinformation, Nutzerorientierte Informationsbereitstellung

1 Einleitung

Die Digitalisierung im Verkehrswasserbau ist eine vordringliche Aufgabe der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Die Infrastrukturverwaltung WSV nutzt eine Informationstechnik (IT), welche zahlreiche Geschäftsprozesse unterstützt und auf einem komplexen System von Softwareanwendungen basiert.

Für viele Aufgaben wurden über lange Jahre separate Entwicklungen aufgebaut, immer wieder erweitert und dem jeweiligen Bedarf angepasst. So entstand ein Mosaik an Anwendungen, Datenbanken und Schnittstellen. Bereichsweise wurden neue Technologien eingeführt, aber auch viele der alten Systeme blieben im Betrieb und wurden immer wieder weiterentwickelt, um sie an die steigenden Anforderungen und die sich stetig ändernden technischen Randbedingungen des Systembetriebes anzupassen.

Um Informationen hoher Qualität nutzerorientiert bereitstellen zu können und damit sowohl die Planung als auch den Bau und Betrieb von Verkehrswasserbauwerken zu verbessern und zu beschleunigen, ist das vordringliche Ziel der Digitalisierung, in einem ersten Schritt, die bestehenden Systeme sinnvoll zu verknüpfen und bedarfsorientiert zu erweitern.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hat in ihrer beratenden Funktion für die WSV einen umfassenden Digitalisierungsansatz mit den vier Handlungsfeldern Prozesse, Daten, Menschen und Grundlagen entworfen (vgl. Heinzelmann et al. (2020)). Drei aktuelle Entwicklungen aus dem Handlungsfeld Daten werden im Folgenden vorgestellt.

2 Datenlandkarte – Bauwerke

In der WSV sind weit über 100 aktive IT-Systeme im Einsatz (vgl. Schenk (2019)). Diese wurden im Vorhaben Datenlandkarte – Bauwerke systematisch erfasst und ausgewertet, um einen Überblick über die vorhandenen Daten der WSV zu bekommen. Im Fokus standen dabei die IT-Systeme, die für den Prozess Planen, Bauen und Betreiben von klassischen Ingenieurbauwerken im Verkehrswasserbau (Wehranlagen, Schiffsschleusenanlagen, Talsperrenanlagen etc.) relevant sind.

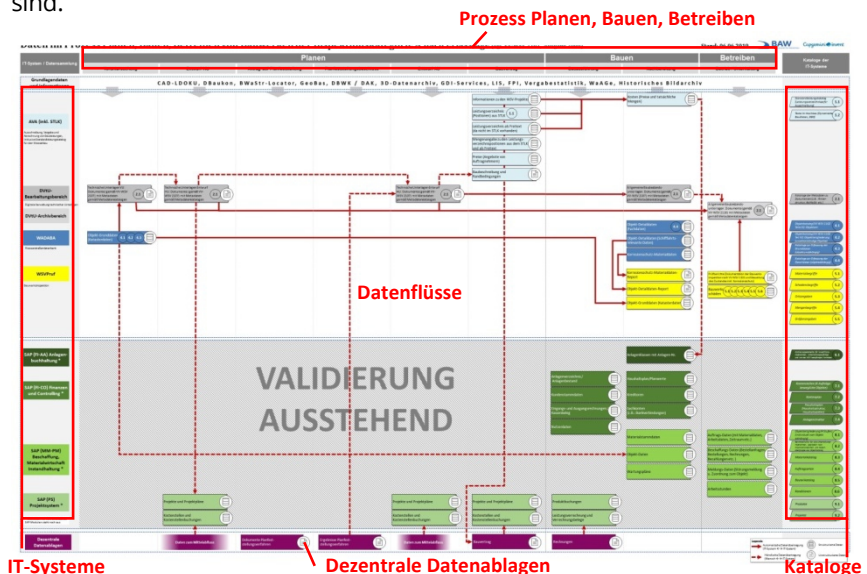
Im Rahmen des Vorhabens wurden nach initialer Sichtung aller Informationsquellen und Priorisierung der IT-Systeme im Hinblick auf den Prozess mit den technischen Ansprechpartnern Interviews geführt. Die identifizierten Daten sowie deren Beziehung wurden anschließend in Form der sogenannten Datenlandkarte - Bauwerke (Abbildung 1) visualisiert.

Die einzelnen Datensammlungen sind dabei den beiden Achsen Prozess Planen, Bauen und Betreiben (X-Achse) und IT-System (Y-Achse) zugeordnet, d. h. die Datenlandkarte – Bauwerke umfasst einerseits die Lokalisierung und Verknüpfung von Daten in den einzelnen IT-Systemen und andererseits den fachlichen Bezug zum Planen, Bauen und Betreiben.

Neben den Datensammlungen sind am rechten Rand der Darstellung außerdem die in den jeweiligen IT-Systemen genutzten Kataloge dargestellt. Kataloge sind verbindlich eingeführte Listen mit Abkürzungen und/oder Identifikationsnummern, wie z. B. der Katalog der Bundeswasserstraßen.

Im Ergebnis wurden fünf IT-Systeme identifiziert: Das für Ausschreibung, Vergabe, Abrechnung von Bauleistungen eingesetzte IT-System, das Baubestandswerk zur Verwaltung technischer Unterlagen, das zentrale Objektkataster der WSV, das IT-System zur Dokumentation der Bauwerksinspektion und das IT-System für die Anlagenbuchhaltung, Materialwirtschaft und Instandhaltung, Projektmanagement und Haushaltsführung.

IT-Systeme mit Grundlagendaten und Informationen, wie z. B. CAD-Systeme, die im Zuge der digitalen Herstellung von Planungsunterlagen zum Einsatz kommen, oder das IT-System für die digitale Leitungsdokumentation, stehen nicht im Fokus der Datenlandkarte. Sie spielen dennoch in verschiedensten Phasen des Prozesses Planen, Bauen, Betreiben eine wichtige Rolle und sind deshalb zusammengefasst am oberen Rand der Datenlandkarte platziert. Ihr grundsätzlicher Einfluss auf die betrachteten Datenflüsse ist durch graue Pfeile veranschaulicht. Daneben gibt es noch eine Vielzahl dezentraler Datensammlungen außerhalb der IT-Systeme, die am unteren Rand dargestellt sind.



In der Datenlandkarte werden zwei Arten von Datenflüssen unterschieden:

- 1) automatische Datenübertragung von IT-System zu IT-System über Schnittstellen (durchgängige Linie) und
- 2) händische Datenübertragung, d. h. die manuelle Dateneingabe durch einen Menschen (gestrichelte Linie).

Über die visualisierten Datenflüsse werden einerseits die Zusammenhänge zwischen den Systeme erkennbar und andererseits die potentiellen Optimierungsmöglichkeiten. Letztere wurden als sogenannte „Quick-Wins“ identifiziert, d. h. deren Umsetzung führt mit absehbarem Aufwand zu einem schnellen Nutzen und wird daher empfohlen. Es handelt sich dabei um

- die verbindliche Nutzung zentraler IT-Systeme,
- die Etablierung einer einheitlichen Bauteilstruktur,
- die Weiterentwicklung des Baubestandswerks,
- die Nutzung einer zentralen Preisdatenbank,
- die Entwicklung einer Schnittstelle zwischen Systemen zur Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung und der Anlagenbuchhaltung
- die Überführung dezentraler Daten in zentrale Datenbanken.

Die vorliegende Ausführung der Datenlandkarte – Bauwerke bildet nur einen kleinen Bruchteil der komplexen IT-Landschaft der WSV ab. Eine Validierung mit den fachlichen Ansprechpartnern der WSV steht aus, sodass die Ausarbeitung weiter angepasst und vervollständigt werden kann.

Hervorzuheben ist, dass die Digitalisierung im Verkehrswasserbau sich nicht nur auf die Daten selbst bezieht, sondern auch auf die Prozesse, in denen Daten entstehen und Daten benötigt werden. Die Prozesse sind daher ein wichtiger Aspekt zur Definition von Informationsbedürfnissen und Basis für die Optimierung und Vernetzung von IT-Systemen und den darin vorgehaltenen Daten (vgl. Heinzelmann et al. (2020)).

3 Objektkataster WinD

Grundlage einer effizienten Verwaltung von objektbezogenen Daten ist eine einheitliche und vollständige Objektidentifikation. Ein derartiges Objektkataster bildet das Rückgrat für alle angebundenen IT-systeme, mit deren Hilfe verschiedenartige objektbezogene Informationen verwaltet werden.

Da das vorhandene Objektkataster der WSV, die WADABA (Wasserstraßen-datenbank) im Hinblick auf IT-Architektur, Datenqualität und Datenquantität dieser Anforderung nicht gewachsen ist, wird derzeit an der Ablösung durch ein neues System gearbeitet. Eine etablierte, komplexe und mit anderen Anwendungen verwobene Anwendung wird sinnvollerweise nicht schlagartig abgelöst sondern in Etappen. Der erste Schritt dieses Ablösungsprozesses ist die Einführung eines Kernsystems, das im Zentrum verschiedener Datenbankanwendungen, die objektbezogene Daten vorhält. Dieses System trägt den Namen WInD (Wasserstraßen-Infrastruktur-Daten).

Ziel der Neuentwicklung ist es, qualitativ hochwertige, flächendeckende Infrastrukturdaten in leicht recherchierbarer Form bereitzustellen. Eine weitere wichtige Rolle spielt die systemübergreifende Nutzung der Daten in anderen IT-Systemen der WSV. Sollen z. B. bautechnische Informationen aus dem einem System mit Zustandsinformationen aus dem anderen System verknüpft werden, ist die einheitliche Objektidentifizierung und die Verwendung von einheitlichen Objektstrukturen in den entsprechenden Systemen eine Grundvoraussetzung. Die Vermeidung von Redundanzen bei der Vorhaltung der WSV-Objektdaten in den zahlreichen IT-Systemen der WSV ist ein zentraler Punkt der Neukonzeption. Dies kann u. a. durch den Gebrauch einheitlicher Kataloge erreicht werden.

Kernpunkte des Konzeptes sind:

- klare Trennung zwischen Objektverwaltung (WInD) und Fachdaten (WInD-Fachdatenbanken)
- Reduzierung der in der WInD-Datenbank geführten Daten auf Daten zur eindeutigen Identifikation, zu Bezeichnung, Lage, Fragen des Eigentums und der Unterhaltung, der Prüfpflicht und des Baujahrs
- Verwaltung von Fachdaten in spezifischen Fachdatenbanken
- verbindliche Festlegung und Bereitstellung von Objekt- und Objektteileidentifizierung für alle relevanten IT-Systeme und Fachdatenbanken
- Zentralisierte Bereitstellung von Katalogen für alle relevanten IT-Systeme

In Abbildung 2 ist der Ist-Zustand der WADABA und der Soll-Zustand mit dem Zielsystem WInD mit den WInD-Fachdatenbanken sowie den Grunddaten, den verbindlich festgelegten Objektstrukturen und den Katalogen grafisch dargestellt.

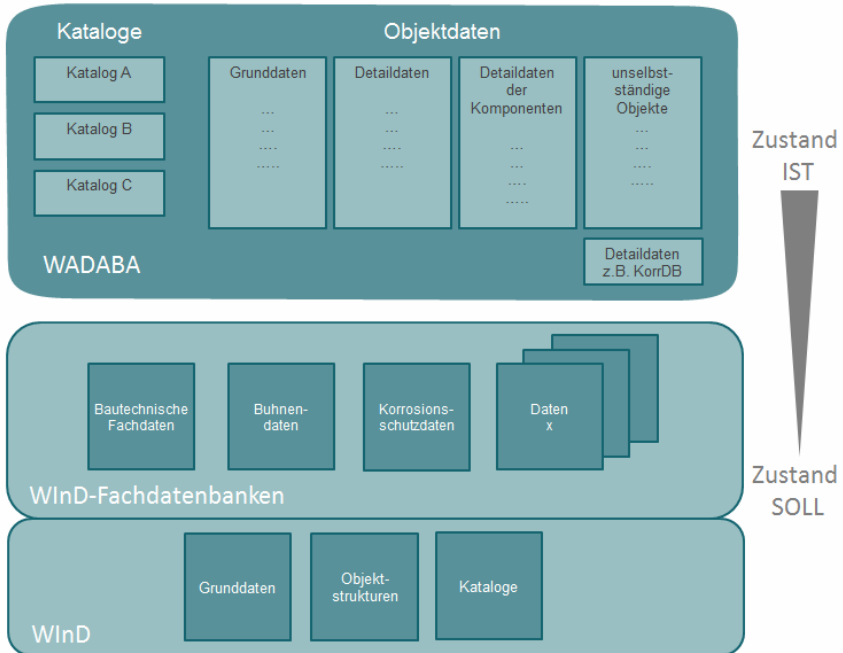


Abbildung 2: Ist-Zustand WADABA (oben) und Soll-Zustand WInD und WInD-Fachdatenbanken (unten)

Aus Sicht der Informationstechnik wird WInD vollständig neu entwickelt. Die Struktur für die Softwarearchitektur von WInD entspricht einem Schichtenmodell bestehend aus Datenhaltungsschicht, Datenzugriffsschicht, Anwendungsschicht und Präsentationsschicht. Grundlage für alle Komponenten ist ein komplexes Datenmodell, das mit UML (Unified Modeling Language) abgebildet wird.

WInD bietet vielfältige Möglichkeiten für die Auswertung und Visualisierung der Daten unter Verwendung existierender Web Map Services (WMS) der WSV wie z. B. der Digitalen Bundeswasserstrassenkarte und dem Verkehrsnetz der Bundeswasserstraßen. Für den Datenaustausch mit anderen Systemen wird WInD SOAP und REST-Schnittstellen anbieten, mit deren Hilfe Daten anderen Anwendungen auf standardisierte Weise zur Verfügung

gestellt werden. Dem Anwender stehen komfortable Recherchemöglichkeiten sowohl über Filter als auch kartenbasiert zur Verfügung. Die Ergebnisse der Recherchen können in verschiedenen Formaten exportiert werden.

Derzeit sind Schnittstellen zu existierenden IT-Systemen implementiert. So kann der Anwender sich für ein ausgewähltes Objekt die zugehörigen technischer Unterlagen, wie z. B. Bestandspläne anzeigen lassen und einen aktuellen Zustandsbericht, der alle aktuell vorhandenen Bauwerksschäden beinhaltet, abrufen. Mit einer weiteren Schnittstelle zum elektronischen Wissensarchiv der BAW, sind BAW-Gutachten und Stellungnahmen zu den ausgewählten Objekten recherchierbar.

Die Entwicklung von WInD erfolgte in Form einer agilen Softwareentwicklung. Im Januar 2020 konnte das System WInD seinen Wirkbetrieb aufnehmen.

4 Projektinformationen für Managementaufgaben

Die Aufgabenwahrnehmung in WSV umfasst unter anderem die Instandhaltung sowie den Neubau von Verkehrswasserbauwerken, wie z. B. Wehranlagen, Schiffsschleusenanlagen und Fischaufstiegsanlagen. Um die Betriebssicherheit dieser Bauwerke zu gewährleisten, sind umfangreiche Instandsetzungen und Ersatzneubauten erforderlich.

Die sich bundesweit an allen Wasserstraßen ergebenden Vorhaben haben zeitliche und inhaltliche Abhängigkeiten zueinander und werden von unterschiedlichen Maßnahmenträgern (Neubauämtern, Fachstellen Maschinenwesen, Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern) durchgeführt. Deshalb wird in der WSV ein wirksames Multiprojektmanagement angestrebt.

In den vergangenen Jahren wurden durch die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) und die WSV bereits verschiedene Initiativen gestartet. So wurde ein Fachkonzept für ein Informationsmanagement in der WSV erarbeitet, welches prototypisch auf Excel-Basis für das Flussgebiet Neckar umgesetzt wurde. Der Excel-Prototyp für das Flussgebiet Neckar bildet bereits den gesamten Informationsmanagementprozess (Erfassung, Aktualisierung, Speicherung und Auswertung von Projektinformationen) ab und schafft einen signifikanten Nutzen zur Befriedigung von Informationsbedürfnissen.

Gleichzeitig wurde für die Projektgruppe Systemkritische Bauwerke (SKB) in der WSV ein Prototyp für die Projektinformationsdarstellung in einem Web-Browser geschaffen. Als systemkritische Bauwerke gelten nicht sperrbare Anlagen, wie z. B. Wehranlagen, Hochwassersperrtore und Talsperrenanlagen, oder verkehrsrelevante Anlagen, wie z. B. Schiffsschleusenanlagen, die sich in einem kritischen Zustand befinden und bei Ausfall oder Versagen eine Gefährdung der Sicherheit für Leib und Leben zur Folge haben. Der Prototyp bietet aktuell einen Überblick zum Projektstand von derzeit 38 als systemkritisch eingestuften Wehranlagen.

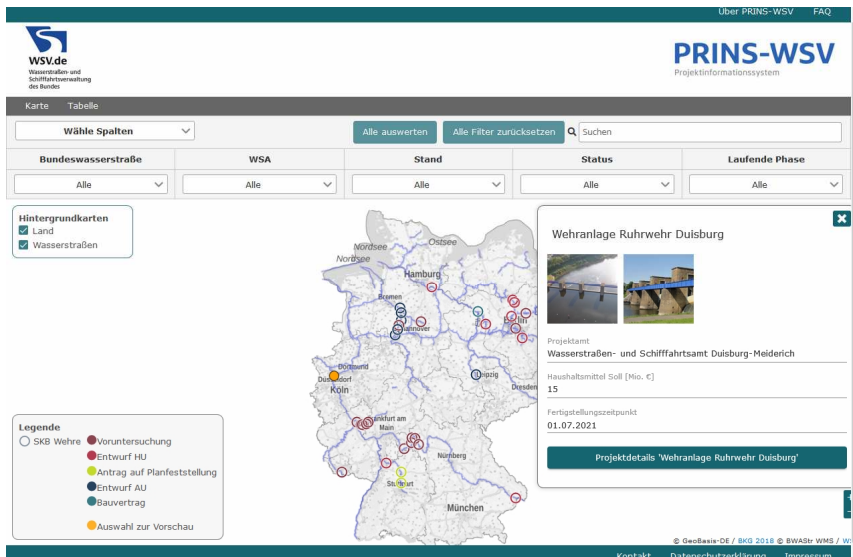


Abbildung 3: Prototyp des Projektinformationssystem SKB

Die Projekte können sowohl in der Karte als auch in der Tabelle angesehen, gefiltert und ausgewertet werden. Abbildung 3 zeigt die Kartenansicht des Prototyps mit den nach ihrer Projektphase eingefärbten Projektstandorten und den Filtermöglichkeiten am oberen Kartenrand.

Die Detailansichten der einzelnen Projekte enthalten bautechnische Grund- und Fachdaten sowie Informationen zum Projektverlauf (Zeit-, Personal- und Finanzinformationen). Über die Projektdetailseite sind außerdem verschiedene Dokumente, z. B. der Voruntersuchung, sowie ein tagesaktueller Zustandsbericht abrufbar.

Dem Prototyp liegt derzeit noch keine grundsätzliche Datenhaltung in einer Datenbank mit dazugehörigen Eingabe- und Prüfmöglichkeiten zugrunde, was die Aktualisierung und Pflege der Projektinformationen erschwert. Der Prototyp demonstriert jedoch die signifikanten Vorteile, die eine interaktive Lösung für die Darstellung und Auswertung von Projektinformationen bietet.

Infolge dieser bereits durch GDWS und WSV gestarteten Initiativen ist eine Dynamik entstanden, die nun in die Entwicklung einer stabilen und langfristigen technologischen Basis münden soll. Die BAW, die die Initiativen der GDWS und WSV als Beraterin und Mitglied in verschiedenen Projektgruppen begleitet hat, entwirft deshalb aktuell ein Konzept um die Vorarbeiten zusammenzuführen und in einem zentralen Informationssystem für das Multiprojektmanagement der WSV zu bündeln.

5 Zusammenfassung

Der Beitrag verdeutlicht anhand aktueller Entwicklungen die Herausforderungen sowie das große Potential, das die Digitalisierung für den Verkehrswasserbau bietet.

Die Datenlandkarte – Bauwerke erfasst existierende bauwerksrelevante Datensammlungen in verschiedenen IT-Systemen der WSV mit dem Ziel einer systemübergreifenden vernetzten sowie nutzerorientierten Informationsbereitstellung. Die Neugestaltung des WSV-Objektkatasters mit dem System WInD ist eine grundlegende Entwicklung zur Erreichung dieses Ziels.

Die aktuellen Entwicklungen fokussieren des Weiteren auf die Bereitstellung von Projektinformationen zur Unterstützung der WSV beim Management ihrer Projekte. Dies kann nur realisiert werden, wenn auch ein Zugriff auf alle projektrelevanten Informationen systemübergreifend gewährleistet werden kann.

Insgesamt bilden die vorgestellten Entwicklungen ein wichtiges Fundament zum Fortschritt der Digitalisierung im Verkehrswasserbau.

Literatur

- Heinzelmann, C., Bödefeld, J., Duric, Z. (2020): Wege zur Digitalisierung im Verkehrswasserbau, 43. Dresdner Wasserbaukolloquium, Dresden 2020
- Schenk, D. (2019): Datenlandkarte – Bauwerke. Erfassung, Analyse und Visualisierung von Daten im Prozess Planen, Bauen, Betreiben. Interner Bericht, Karlsruhe

Autor:

Dr.-Ing. Daniela Schenk

Charlotte Laursen

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Bautechnik
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Bautechnik
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 97265 145
Fax: +49 721 97264 540
E-Mail: daniela.schenk@baw.de

Tel.: +49 721 97264 840
Fax: +49 721 97264 540
E-Mail: charlotte.laursen@baw.de

Wehranlage Viereth: Chancen einer durchgängigen Bearbeitung als BIM-Projekt vom Entwurf bis zur Werkstattplanung

Elmar Wilde
Matthias Schäfers
Norman Braun
Christian Zehnter

Es wird die Grundinstandsetzung der Wehranlage Viereth beschrieben, die durchgängig mit demselben Planungsteam mit der BIM-Methode bearbeitet wurde.

Stichworte: Wehr, BIM, Vertragsmodelle

1 Wehranlage Viereth: Veranlassung zur Grundinstandsetzung

Die Staustufe Viereth mit einer maximalen Fallhöhe von 6,0 m wurde als erste einer Kaskade von Staustufen am Main 1924/25 in Betrieb genommen. Sie besteht aus einer zweifeldrigen Wehranlage mit jeweils 30 m Feldbreite, einer Schleuse und einem Laufwasserkraftwerk.

Die Wehranlage Viereth ist die älteste Staustufe am Main. Der Stahlwasserbau hat das Ende seiner Lebensdauer erreicht. Dies manifestiert sich im Besonderen in folgenden Defiziten der Anlagenteile:

- Deutliche plastische Verformungen der Zahnkränze
- Daraus resultierende Schiefstellungen der Verschlüsse
- Daraus resultierende Schwingungen bei kleinen Spaltweiten
- Undichtigkeiten durch beschädigte Verformungen
- Korrosionserscheinungen und Bauteilschwächungen



Abbildung 1: Luftbild der Wehranlage Viereth (Quelle: WSA Schweinfurt)

Die maßgebliche Schädigung der Zahnkränze resultiert ab 1986 aus der wesentlichen Änderung der Betriebsweise der Verschlüsse mit dem Beginn der automatisierten Abfluss- und Stauzielregulierung am Main. Die Wasserstände werden im Vergleich zur damaligen händischen Bedienung heute automatisch in engen Grenzen geregelt. Dadurch wird die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt verbessert, aber auch die Betreiber der Wasserkraftwerke nutzen aus wirtschaftlichen Gründen die maximale Fallhöhe aus und regulieren daher das Oberwasser nahe am oberen Grenzwert. Daraus resultieren bei Wasserabfuhr über das Wehr eine Vielzahl von kleinen Auf- und Ab-Bewegungen einer Wehrwalze mit jeweils 160 t Gewicht.

Besonders bei kleinen Spaltweiten werden die Wehrwalzen zum Schwingen angeregt. Diese Schwingungen vergrößern die Ermüdungsproblematik der Verschlüsse im Allgemeinen nochmal deutlich, wodurch die Ermüdungsproblematik weiter verschärft wird.

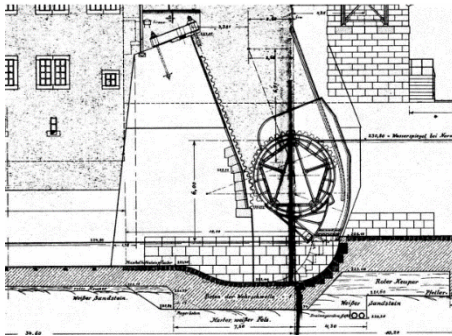


Abbildung 2: Links: Historischer Verschluss Viereth (Quelle: WNA Aschaffenburg);
Rechts: Zahnkranz mit plastischen Verformungen (Quelle: IRS AG)

Die festgestellten Schäden am Stahlwasserbau und die dafür ursächliche Betriebsweise einerseits und der relativ gute Zustand des Massivbaus andererseits, führten zu der Entscheidung, die Wehranlage grundinstand zu setzen. Dabei erwies sich der Einbau neuer Verschlüsse im Vergleich mit der Instandsetzung der bestehenden Verschlüsse als wirtschaftlicher.

Neben der erheblich längeren Nutzungsdauer der neuen Verschlüsse sind weitere Aspekte in die Betrachtung eingeflossen:

Der Stahlbau ist geometrisch funktional mit dem Maschinenbau und den elektrotechnischen Bauteilen verbunden. Änderungen am Stahlwasserbau ziehen daher meist Änderungen am Massivbau und in der Elektrotechnik nach sich. Dies gilt im Allgemeinen auch beim Erhalt der Verschlusssysteme, da sich die Anforderungen zum einen über die Änderungen der technischen Regelwerke, aber auch infolge von Arbeitsschutzgesetzen, etc. sehr stark geändert haben und heute meist aufwendigere und schwere Konstruktionen erforderlich werden.

Beim Erhalt der Verschlüsse wäre aufgrund der geänderten Betriebsweise auch künftig mit einem erhöhten Verschleiß zu rechnen.

Die aufgrund von Auflagen für Arbeitssicherheit und Umweltschutz aufwändige Entfernung des schadstoffbelasteten Korrosionsschutzes vor Ort entfällt bei einem Verschlusswechsel.

Die Entscheidung zum Verschlussaustausch machte Betrachtungen im Hinblick auf die bauliche Durchführung und dabei zu beachtende Randbedingungen erforderlich.

Wehranlagen müssen generell nach DIN 19700-13:2004-07 der n-1 Bedingung genügen. Diese Bedingung sagt aus, dass bei einem Wehr mit n Wehrfeldern bei einem zufälligen Ausfall eines Verschlusses (n-1 Wehrfelder), zum Beispiel durch die zufällige Funktionsunfähigkeit eines der Antriebe, das Bemessungshochwasser abgeführt werden muss, ohne das Wasserstände überschritten werden.

Zwischen der Bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung als Einvernehmensbehörde und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung als Betreiber und Träger des Vorhabens wurde daher einvernehmlich vereinbart, dass für die Grundinstandsetzung der Wehranlage Viereth immer nur eines der beiden Wehrfelder außer Betrieb genommen wird und die Bauzeit auf die weniger hochwassergefährdeten Sommermonate beschränkt wird. Um ein kleineres Sommerhochwasser schadlos abführen zu können, wurde eine Baugrubenumschließung entwickelt, die eine bauzeitliche Wasserabfuhr durch die Baugrube ermöglicht. Hierzu wurde eine Baugrubenumschließung im Unterwasser und ein Revisionsverschluss für das Oberwasser entwickelt, die ebenfalls eine Veröffentlichung rechtfertigen. Das Hauptaugenmerk soll jedoch im Weiteren auf den Hauptverschlusskörper gelegt werden.

2 Wehranlage

2.1 Verschluss Drucksegment mit Fischbauchklappe

Als ursprüngliches Verschlusssystem war an der Bestandsanlage eine Versenkwalze und eine Normalwalze vorhanden.

Eine Walze mit Ihrem technischen Ursprung aus dem Jahre 1903 hat heutzutage einige grundsätzliche Probleme, die es unter bestimmten Randbedingungen technisch sinnvoll macht, den Typ des Verschlusskörpers bei größeren Instandsetzungen eher zu wechseln.

Bei Walzen sind im Wehrpfeiler immer Nischen über die volle Hubhöhe vorhanden. In diesen Nischen befinden sich eine Zahnstange und üblicherweise Ketten zum Heben der Walzen. In diesen Nischen kann sich bei Hochwasser Treibgut ansammeln und damit zu einer Einschränkung in der Betriebssicherheit führen. Nischen, die hier Tiefen bis 1,80 m aufweisen, sind bei der Hochwasserabfuhr geringfügig weniger günstig als eine glatte Betonoberfläche.

Bei einer Walze befinden sich, wie bereits beschrieben, Bauteile des Antriebs in der Wasserwechselzone bzw. immer unter Wasser. Diese unterliegen hier erhöhten Korrosionsbeanspruchungen, im Besonderen da auf die Flanken von z.B. Zähnen des Antriebs kein Korrosionsschutz aufgebracht werden kann. Zur handnahen Inspektion dieser Bereiche muss das Wehr immer trockengelegt werden und diese Bereiche sind auch dann nur schwer zugänglich.

Bei einem modernen Drucksegment, wie es in Viereth geplant wurde, kann man alle Bauteile die der Bewegung dienen, leicht oberhalb der Wasserlinie anordnen. Damit sind diese Bauteile wesentlich leichter zu inspizieren, zu warten und in Stand zu halten.

Historische Verschlüsse sind im Allgemeinen wesentlich leichter als vergleichbare neuere Verschlüsse, da die technischen, sowie die konstruktiven Anforderungen aus der Arbeitssicherheit, Arbeitserleichterungen aufgrund weniger Instandhaltungspersonal, Zugänglichkeiten etc. zu wesentlich schwereren Konstruktionen führt. Der alte vorhandene Verschluss wiegt 160 t. Hier ist es aber durch den Verschlusssystemwechsel und geschickte Detailarbeit gelungen, selbst unter diesen Randbedingungen, das Gewicht des Verschlusses um 12,5% auf ca. 140 t zu reduzieren und obwohl die integrierte Aufsatzklappe, durch ihre konstruktiven Anforderungen den Verschluss tendenziell schwerer werden lässt.

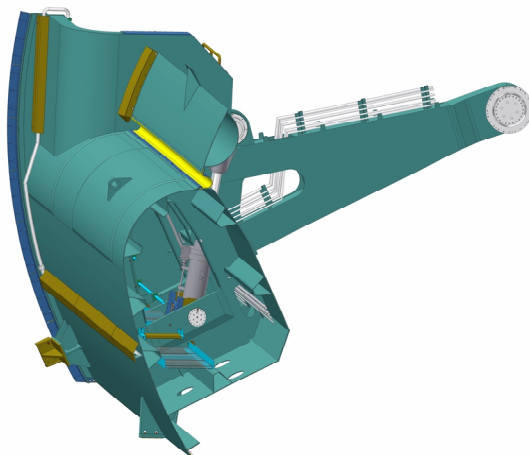


Abbildung 3: Querschnitt Drucksegment und Aufsatzklappe (Quelle: IRS)

Die Aufsatzklappe regelt kleinere Abflüsse, um den Oberwasserstand innerhalb der vorgegebenen Grenzen zu halten, ohne den gesamten Verschluss heben zu müssen. Eine Regulierung durch eine Aufsatzklappe erfolgt sehr leichtgängig, effizient, zielgenau und deutlich schneller im Vergleich zur früheren Regulierung mit dem kompletten Walzenverschluss.

Die Lager der Klappe beeinflussen das statische System des Drucksegmentes sehr stark. Die Klappe als Fischbauchklappe trägt immer zur Gesamttragfähigkeit bei. Dies könnte für die Tragfähigkeit des unteren Verschlusskörpers vernachlässigt werden, für die Bauteile die zur Übertragung der Lagerkräfte aus der Klappe in den eigentlichen Wehrverschluss dienen aber nicht. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Klappe sich in verschiedenen Stellungen und Lastzuständen befinden kann. Ebenso sind die Last- und Zwangseinwirkungen zum Beispiel aus Temperatur oder Eisdruck einzubeziehen.

Ein hierbei zu erwähnender Bauzustand der besonders bei der Auslegung der Klappenlager berücksichtigt werden muss, ist das Einstauen. Der Verschlusskörper wird hierbei bis zu den Klappenlagern eingestaut, die Klappe jedoch steht oder ist abgelegt. Der Verschluss und die Klappe biegen sich in diesen Zuständen unterschiedlich durch und die Klappe steift den Verschlusskörper in Ihren Stellungen unterschiedlich aus. Dies ist besonders bei der Bemessung der Klappenlager zu berücksichtigen.

2.2 Maschinenbau Drucksegment und Fischbauchklappe

Für die Antriebsgestaltung am Wehr Viereth fiel die Wahl auf effiziente Hydraulikzylinder sowohl für das Segment als auch für die Klappe. Die Antriebszylinder der Klappe lassen sich durch Öffnungen des Segmentes mittels Montagehilfseinrichtungen als Führungskonstruktion ein- und ausbauen. Zusätzlich ist durch eine demontierbare Begehung am Drucksegment auf der Unterwasserseite eine gute Zugänglichkeit der Klappenzyylinder gegeben.

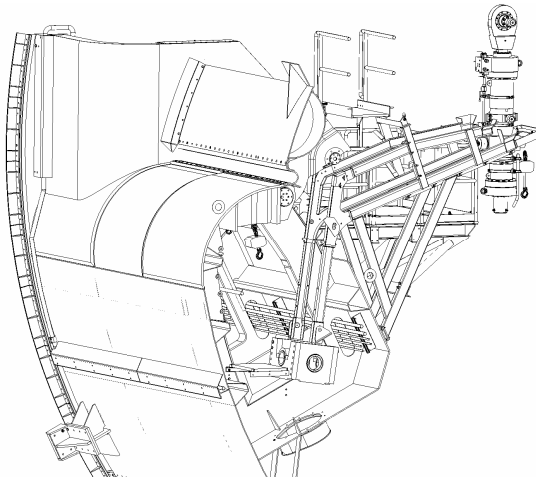


Abbildung 4: Querschnitt mit Montagehilfsvorrichtung (Quelle: IRS AG)

Die Hubzylinder des Drucksegmentes lassen sich durch einen Kraneinsatz vom Oberwasser her oder mit entsprechenden Montagehilfseinrichtungen austauschen.

Hohe maximale Flexibilität für den Betrieb und die Unterhaltung sind somit gegeben.



Abbildung 5: Bauzustand des Drucksegmentes (Quelle: IRS AG)

3 Ablauf der Planung

Zunächst wurde 2009 vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Schweinfurt (WSA) in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro IRS eine Vorstudie zu denkbaren Varianten zur Ertüchtigung der Anlage erstellt.

Parallel wurde eine detaillierte Erkundung des Bestandes durch das WSA durchgeführt und weitere Schäden an der Gesamtanlage festgestellt. Die Vorstudie und die Erkundungen hatten eine Bedarfsanalyse und eine Voruntersuchung nach der Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes VV-WSV 2107 zum Gegenstand, welche zum Ergebnis kam, die Gesamtanlage auf die neuen Anforderungen des Betriebs und eine neue Lebensdauer von ca. 70 Jahren zu ertüchtigen. Über entsprechende Planungsvorgaben der Vorplanung 2010 (IRS und Bundesanstalt für Wasserbau BAW) und der Entwurfs- und Ausführungsplanung 2012 (IRS und KREBS+KIEFER) wurde die Gesamtanlage umgeplant, so dass die Baumaßnahmen 2014 beginnen konnten. Die Projektabwicklung wechselte 2012 vom WSA Schweinfurt zum Wasserstraßen-Neubauamt Aschaffenburg (WNA). IRS und KREBS+KIEFER haben zusammen mit dem WNA die Anlagenteile geplant, ausgeschrieben und baulich auch während der Fertigung begleitet. Die Werkstattplanung wurde nach Abstimmung mit dem WNA und dem Bauauftragnehmer ebenfalls durch IRS AG durchgeführt. Das hatte für den Auftraggeber den Vorteil, dass keine Schnittstellen in der Bearbeitung aufgetreten sind und keine Reibungsverluste beim Wissenstransfer und damit verbundene Probleme entstanden sind. Es konnte ohne sonst übliche neuerliche Modellbildung durch Dritte Beteiligte und dem weniger tiefen Verständnis der einzelnen Komponenten die Lösungen somit durchgängig durch das selbe Planungspersonal bis in die Werkstatt und auf die Baustelle weiterverfolgt, optimiert und begleitet werden.

Im mehreren Teilmaßnahmen zum Kolkboden, der Baugrubenumschließung, dem schwimmenden Oberwasserrevisionsverschluss, dem Baukranfundament, den Pfeilverlängerungen und den Wehr- und Schleusenstegen wurden in den Jahren 2014 bis 2017 die Voraussetzungen für den eigentlichen Verschlusswechsel geschaffen. Aufgrund eines Vergabennachprüfungsverfahrens ruhte die Baustelle 2018. Der Einbau des ersten Drucksegmentes mit dem Umbau der Pfeiler erfolgte 2019. Der stand rechtzeitig zur Hochwassersaison 2019/2020 zur Wasserabfuhr bereit. Der zweite Verschlusswechsel erfolgt 2020 und 2021 werden Restarbeiten durchgeführt.

4 Beschreibung des Planungsablaufs

Die Bearbeitung erfolgte von Anfang an in einem 3D-CAD-System in einer numerischen Repräsentanz – BIM –. Dabei werden verschiedene detailierte Submodelle vereinfacht und zu einem Gesamtmodell zusammengefügt.

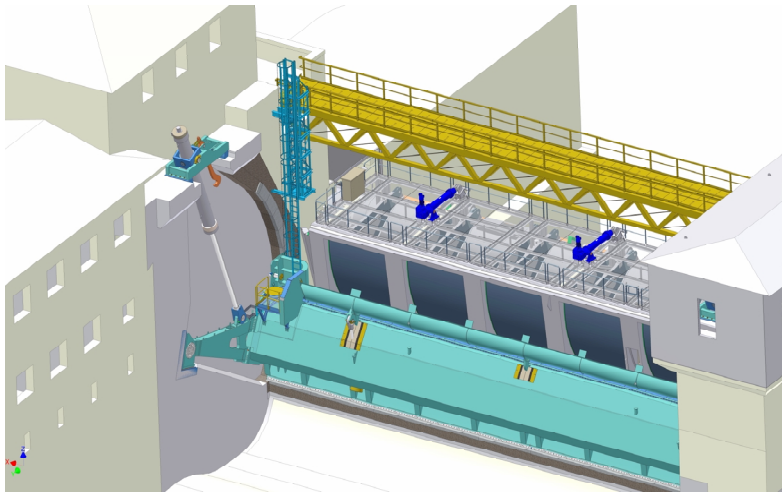


Abbildung 6: Segment und Oberwasserrevisionsverschluss (Quelle: IRS AG)

Die Modelle umfassen dabei den Massivbau im Bestand, den zu ersetzen den Massivbau aufgrund der geänderten Konturen und Lasteinleitung, den Bauteilen des Stahlwasserbaus, wie den Revisionsverschluss im Oberwasser, die Baugrubenumschließung im Unterwasser, den Verschlusskörper des Wehres und die Einbauteile sowie die technische Ausrüstung bestehend aus Maschinenbau und Elektrotechnik. Dafür war eine umfassende Aufnahme des Bestandes nach Flyvberg, et. al. (2003) erforderlich, bei Neubauprojekten sind das natürlich Aufschlüsse über den Baugrund. Beim Bauen im Bestand sollten sowohl die Abmessungen als auch die Qualitäten der Baustoffe im Detail aufgenommen werden.

Dabei muss aufgrund des Datenvolumens das einzelne Detailmodell ausgedünnt werden um handhabbare Gesamtmodelle zu erhalten. Hier kann eine Kollisionsanalyse der einzelnen Bauteile erfolgen. Die Besonderheit im Stahlwasserbau ist die Beweglichkeit der Verschlüsse, mindestens zwischen einer Position offen und geschlossen. Die zurzeit verwendeten üblichen BIM-Programme können lediglich eine statische Kollisionsanalyse vornehmen, also untersuchen, ob sich ortsfeste Bauteile durchdringen. Für eine dynamische Kollisionsanalyse muss auf maschinenbauliche Software zurückgegriffen werden, welche die gleiche Funktionalität erfüllt. Das Ergebnis muss dann in einen BIM-Prozess überführt werden.

Die Modelle sind so detailliert, dass alle Massen einfach zu generieren sind und auf diese Weise mit einer Schnittstelle zu einem AVA-Programm die Verdingungsunterlagen schnell und sicher gegriffen werden können. Die heutigen Abrechnungsmethoden nach VOB sind historisch gewachsen und schreiben Vereinfachungen für die Abrechnung vor. Diese wären bei einer durchgängigen Bearbeitung nach BIM nicht mehr erforderlich, da alle Maße und Massen exakt eingepflegt werden können.

In der ebenfalls durchgängig erfolgten Werkstattplanung konnte das vorhandene Modell leicht auf eine blechgenaue Konstruktion der Stahlbauten und des Maschinenbaus mit allen Schweißnahtvorbereitungen, mechanischen Bearbeitungen etc. erweitert werden.



Abbildung 7: Bauzustände im Werk (Quelle: IRS AG)

Auch die Zusammenbaureihenfolge konnte so leicht geplant und verfolgt werden. Die Montage, eine klassische Nebenleistung der Bauunternehmen, wurde in 3D in einzelnen Schritten auf ihre Durchführbarkeit hin untersucht. Durch geringes Kippen des Verschlusses aus der Lagerposition heraus, konnten der Lichtraum zwischen dem Massivbau und der Konstruktion des Stahlwasserbaus von 5 cm auf 25 cm vergrößert werden. Somit wurden die Risiken beim Einbau des Verschlusses aus z.B. Ungenauigkeiten der Lage des Verschlusses, Windkräfte, der Hebemittel etc. minimiert. Daraus resultierte die Empfehlung an dieser Stelle den Einsatz eines standardisierten Manipulationssystems auf der Basis von Hydraulikzylindern vorzusehen.

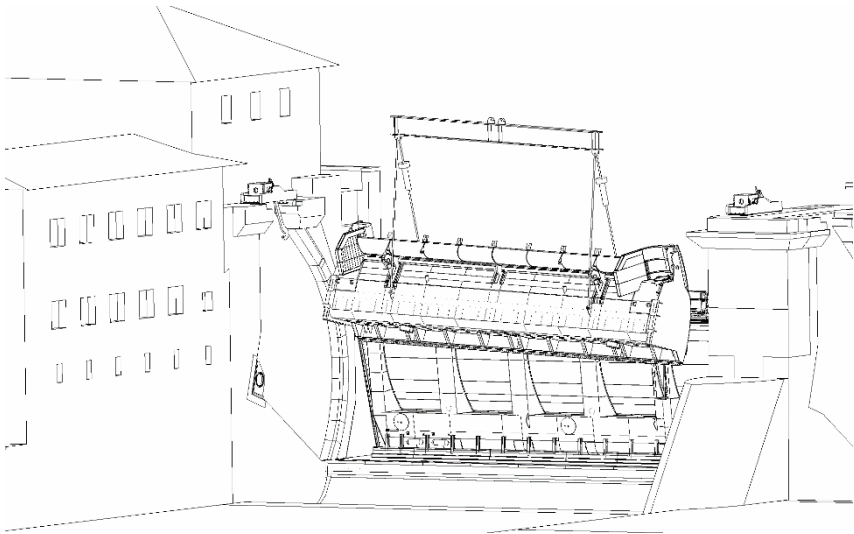


Abbildung 8: Planung der Montage (Quelle: IRS AG)

Die ausführende Firma hat diese Idee aufgegriffen und lediglich die Zylinder durch bauübliche Litzenheber ersetzt.



Abbildung 9: Montage vor Ort (Quelle: IRS AG)

Die klassische Vergabe sieht vor, eine Planung bis hin zu einer Ausführungsplanung als freiberufliche Leistung vorzusehen und danach eine Ausschreibung der gewerblichen Leistungen vorzunehmen. Dieses Prinzip wird durch den Endbericht der Reformkommission Bau von Großprojekten (2015), in dem unter Punkt 2, „Erst Planen dann Bauen“ gefordert wird, noch gestützt. Dieses Prinzip ist in der Praxis wenig zu beobachten. Vergaben von Planungsleistungen werden immer stärker dem Primat der Planungskosten unterworfen, was im Gegensatz zur der Reformkommission Bau von Großprojekten (2015) steht, die unter Punkt 4 „die Vergabe an den Wirtschaftlichsten, nicht den Billigsten“ empfiehlt. Nach der Ausführungsplanung kommt es dann zu einem Bruch in der technischen Bearbeitung, da im Allgemeinen spätestens nach der Ausführungsplanung zum Wechsel in die Werkstatt- und Montageplanung auch ein Wechsel der technischen Bearbeitung stattfindet. Dabei geht wesentliches Wissen über die Konstruktion verloren, das explizit oder auch implizit in die BIM-Modelle eingeflossen ist.

Eine Alternative wird heute als Planen und Bauen diskutiert, dabei fertigen mehrere Bauunternehmen mit jeweils eigenen technischen Stäben Entwürfe an. Das heißt das die Planung, die in der Vergangenheit durch den AG durchgeführt wurde, dann mehrfach durch jeden Bieter vorgenommen

wird. Hierbei ist häufig die Genauigkeit der Ausarbeitung weniger hoch. Auch dieses birgt ein erhebliches Konfliktpotential. Bei einem für alle Modelle idealen Projektverlauf wird hier während der Angebotsphase ein Mehrfaches der Ingenieurkapazitäten gebunden, wie im klassischen Verfahren mit vorgeschalteter Ausführungsphase. Dieses Verfahren bietet also dann einen gesellschaftlichen Nutzen, wenn unter realen Projektverläufen mit Konflikten, Verzögerungen, etc. die Zeitersparnis größer ist, als die zusätzlichen erforderlichen Kapazitäten während der Angebotsphase. Die direkten Kosten des Verfahrens sind nicht alleine ausschlaggebend, langfristig müssen die gesamten Kosten für eine Bauunternehmung bezahlt werden. Aus internationaler Erfahrung ist festzustellen, dass dieses Verfahren nicht konfliktfrei ist und auch erhebliche Verzögerungen auftreten können.

Beim Projekt Viereth wurde ein anderer Weg beschritten und es hat sich ergeben, dass die Planung eine durchgängige technische Bearbeitung vom Entwurf bis zur Werkstattplanung hatte. IRS hat zunächst für das WNA den Entwurf und die Ausführungsplanung erstellt, danach mit Genehmigung des Amtes für den Bauauftragnehmer die Werkstatt- und Montageplanung durchgeführt. Dabei konnte auf das 3D-Modell mit allen Funktionalitäten zurückgegriffen werden. Es fand kein Mitarbeiterwechsel statt, so dass das gesamte Wissen über die Entwicklung von konstruktiven Lösungen weiter in die Werkstattplanung eingeflossen ist. Dies war eine wesentliche Voraussetzung um den sich vorgesehenen Zeitplan zu erreichen.

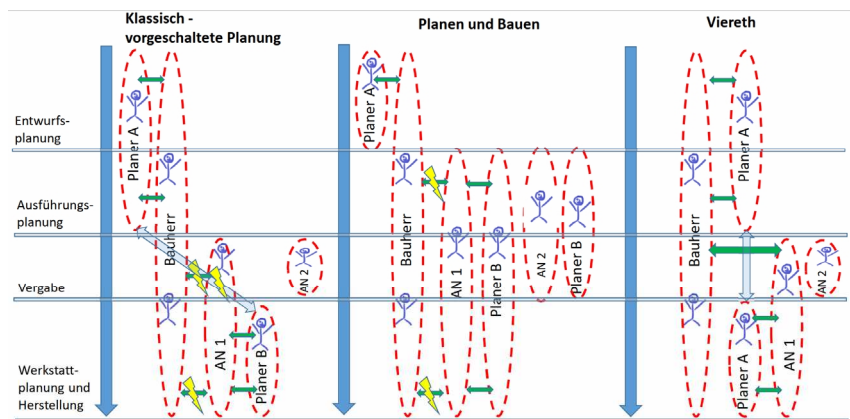


Abbildung 10: Schemata der Vergaben

Es gibt sicherlich kein Vertragsmodell, dass für alle Kategorien von Projekten geeignet wäre. Für jedes Projekt, dass durch Größe, Komplexität, aber auch durch die handelnden Personen und Kulturen bei den Auftraggebern und Unternehmen geprägt ist, gibt es sicher ein Modell, dass zum besten Ergebnis führt. Hier konnte ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden. Es ist eine permanente Aufgabe unter den sich ständig wandelnden Auftrags- und Marktbedingungen das jeweils richtige Vorgehen zu wählen.

5 Literatur

Flyvberg, B.; Bruzelius, N. Rothengatter, W. (2003): Megaprojects and Risk – An Anatomy of Ambition. Cymbridge University Press Neuer Verlag der Kunst am Stück, Cambridge 2003

Reformkommission Bau von Großprojekten, Komplexität beherrschen – kostengerecht, termintreu und effizient (2015): Endbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015

Autoren:

Dipl.-Ing. Elmar Wilde

Sachbereichsleiter Wehre
Wasserstraßen Neubauamt
Aschaffenburg
Hockstraße 10
63743 Aschaffenburg

Tel.: +49 6021 312 3200

Fax: +49 6021 312 3101

E-Mail:

Elmar.Wilde@wsv.bund.de

Dr.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH)

Matthias Schäfers

Dipl.-Ing. (FH) Norman Braun

Christian Zehnter

IRS Stahlwasserbau Consulting AG

Max-von-Laue-Str. 12

97080 Würzburg

Tel.: +49 931 359334-0

Fax: +49 931 359334-50

E-Mail:

sekretariat@irs-stahlwasserbau.de

Das neue Schiffshebewerk Niederfinow als Beitrag zur Bau- kultur in Deutschland

Dipl.-Ing. Rolf Dietrich

Der Neubau eines Schiffshebewerkes erfolgt in Deutschland durchschnittlich nur einmal alle 50 Jahre. Das Bauvorhaben stellt damit besondere Anforderungen an alle Projektbeteiligten und ist gleichzeitig ein herausragendes Zeugnis für das Bauingenieurwesen und die Baukultur in Deutschland. Kurz vor der Fertigstellung der neuen Anlage lohnt sich ein Blick zurück auf die Entwicklung dieses außergewöhnlichen Großbauvorhabens. Dabei zeigt sich, dass es für eine erfolgreiche Entwicklung interdisziplinärer Projekte im Verkehrswasserbau nicht nur auf den digitalen Wandel ankommt.

Stichworte: Schiffshebewerk Niederfinow, Baukultur, virtuelle Inbetriebnahme

1 Projektziele und Voruntersuchung

1.1 Veranlassung

Das Schiffshebewerk Niederfinow liegt an der Havel-Oder-Wasserstraße und ist integraler Bestandteil der internationalen Wasserstraße E70 von Rotterdam bis nach Klaipėda. Über den Streckenabschnitt der Hohensaaten-Friedrichsthaler Wasserstraße, einen Parallelkanal zur Oder, schließt sie den Seehafenverbund Szczecin/Swinoujście, unabhängig von Niedrigwasserereignissen auf der Oder, an das westeuropäische Binnenwasserstraßennetz an.

Mit weniger als 80 ungeplanten Ausfalltagen über die Betriebsdauer gilt die 1934 in Betrieb genommene Anlage als Sinnbild der Zuverlässigkeit und wurde im Jahr 2007 durch die Bundesingenieurkammer mit dem Titel „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“ ausgezeichnet.

Nach inzwischen 85 Betriebsjahren ist die Anlage jedoch am Ende ihrer Nutzungsdauer angelangt. Zunehmende Probleme mit der Materialalterung und der Beschaffung von Ersatzteilen für die aus den 1930er Jahren stammende Anlagentechnik waren Anlass für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, rechtzeitig ein Projekt für einen Ersatzneubau aufzulegen.

1.2 Ziele

Mit nutzbaren Fahrzeugabmessungen bis 82 m Länge, 9,50 m Breite und 2,0 m Abladetiefe und einer Durchfahrthöhe von 4,0 m, stellt das alte Schiffshebewerk einen Engpass im transeuropäischen Wasserstraßennetz dar, so dass der Ersatzneubau zukunftsicher auf die Bemessungsfahrzeuge der Wasserstraßenklasse Va/b mit 110 m Länge, 11,40 m Breite und 2,80 m Abladetiefe ausgelegt wurde. Entsprechend den Verkehrsprognosen soll die neue Anlage bis zu 4,4 Mio. Ladungstonnen pro Jahr bewältigen. Aufgrund der langen Bauzeit kam dazu nur ein lageversetzter Neubau in neuer Trasse infrage.

1.3 Ergebnis der Voruntersuchung

Im Zuge der Voruntersuchungen wurden mehrere Trassenvarianten und konstruktive Lösungsmöglichkeiten untersucht. Maßgeblich für die Variantenentscheidung war vor allem die Vorgabe der Wasserwirtschaft, einen anlagenbedingten Eintrag von Wasser der Oder in das Einzugsgebiet der Havel soweit wie möglich zu vermeiden. Während das Wasser der Havel im Oberwasser praktisch Trinkwasserqualität besitzt, ist das Wasser der Alten Oder im Unterwasser von der landwirtschaftlichen Nutzung des Oderbruches geprägt.

Die Entscheidung zu Gunsten eines Senkrechtbewerks in einer kurzen neuen Trasse zwischen der alten Schleusentreppe (seit 1972 außer Betrieb) und dem alten Hebewerk war jedoch auch die umweltverträglichste und hinsichtlich der Bau- und Betriebskosten kostengünstigste Lösung.

2 Entwurfs- und Genehmigungsplanung

2.1 Verwaltungsentwurf

Mit dem Ziel der Risikominimierung für einen beherrschbaren Bauvertrag hatte sich der Auftraggeber entschieden, wesentliche Teile des Verwaltungsentwurfes bereits bis weit in die Tiefe einer Ausführungsplanung i. S. der HOAI bearbeiten zu lassen. Dies betraf insbesondere die Baugrube, die Gründung und die prüfbare Bemessung wesentlicher tragender Teile, aber

auch zahlreiche „Leitdetails“ für den Maschinenbau als Vorgabe für die spätere Bearbeitung der Ausführungsunterlagen.



Abbildung 1: Das neue Schiffshebewerk Niederfinow

Besonderes Augenmerk wurde auch auf die Baugrunderkundung gelegt. Dafür wurden mehrere Erkundungskampagnen mit insgesamt über 10.000 lfd. m Aufschlussbohrungen bis auf -120 müNN und 4.000 lfd. m Drucksondierungen ausgeführt.

Der gewählte Mikrostandort für das neue Schiffshebewerk zeichnet sich dadurch aus, dass trotz der fluvioglazialen Baugrundverhältnisse ein geradezu idealer Gründungsstandort auf gut gestuften Sanden und Kiesen gefunden werden konnte.

Für die Baugrube wurde eine gedichtete kombinierte Trägerbohlwand geplant und später auch anforderungsgerecht ausgeführt, die einfach rückverankert und mit einer 1,20 m starken Unterwasserbetonsohle ausgesteift wurde.

Als technische Lösung für die Anlage wurde erneut ein Senkrechtbewerk nach dem Gegengewichtsprinzip geplant, welches im Gegensatz zu seinem Vorgänger in einer kombinierten Bauweise aus Beton und Stahl ausgeführt wurde. Antriebs- und Sicherungstechnik folgen jedoch funktional den gleichen Prinzipien wie am alten Hebewerk. Vier gleichlaufende Ritzel treiben den Trog über am Traggerüst fest montierte Triebstockleitern an. Die Trog-

sicherung erfolgt über vier in Mutterbacken mitlaufende Drehriegel, die im Havariefall einen Absturz des Troges verhindern.

2.2 Konstruktive Gestaltung

Anlagen wie das Schiffshebewerk Niederfinow sind stets auch herausragende Landmarken und Aushängeschilder für die Ingenieurbaukunst in Deutschland. Das Wasserstraßen-Neubauamt Berlin hat daher den Architekten Udo Beuke aus dem damaligen Referat Konstruktive Gestaltung bei der Bundesanstalt für Wasserbau mit der Gestaltung des neuen Hebewerkes beauftragt.

Als Genius loci hat sich der Architekt von der Gestaltung der Hallenkirche des nahe gelegenen Klosters Chorin inspirieren lassen. Und tatsächlich wirkt die neue Anlage auf den Betrachter wie eine Kathedrale der Ingenieurbaukunst. Die Fassadengestaltung erfolgte nach dem Kontrapost und die Umsetzung des Leitsatzes form follows function steht der neuen Anlage auch gut zu Gesicht.

Nicht zuletzt ist es gelungen, die neue Anlage, trotz ihrer gewaltigen Abmessungen von 56 m Höhe, 133 m Länge und 47 m Breite, harmonisch in die Landschaft einzufügen, ohne sie dabei verstecken zu wollen.

2.3 Genehmigungsplanung

Aufgrund der vergrößerten nutzbaren Abmessungen war das Bauvorhaben als Ausbautatbestand nach dem Bundeswasserstraßengesetz planfeststellungspflichtig. Die hohe Projektakzeptanz und die konstruktive Unterstützung der zuständigen Landes- und Kommunalbehörden haben für einen reibungslosen Ablauf des Planfeststellungsverfahrens gesorgt.

Beispielhaft kann diese Zusammenarbeit an einem baubegleitenden Planänderungsverfahren für das Bodenverbringungskonzept zum Bau des Unteren Vorhafens plakatiert werden. Aufgrund der Fortentwicklung des Abfallrechtes konnten über 100.000 m³ im Baufeld natürlich anstehender sulfatsaurer Niedertorfmoorböden nicht mehr wie ursprünglich geplant in den Wirtschaftskreislauf eingestellt werden, weil der damit verbundene „Entledigungswille“ unausweichlich zu deren formalrechtlicher Einstufung als Sonderabfall geführt hätte. Mit proaktiver Unterstützung des betroffenen Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin und der zuständigen Wasser-, Abfall- und Bodenschutzbehörden wurde daraufhin eine Lösung entwickelt, die eine unmittelbare Weiterverwendung der schützenswerten Torfmoorböden vorsieht. Dafür werden die Böden milieugleich in den nicht mehr benötigten Unteren Vorhafen der alten Schleusentreppe umgelagert und als neuer Moorstandort mit einem langjährig angelegten Monitoring erhalten.

Der aktuelle Minister für Landwirtschaft, Umwelt- und Klimaschutz des Landes Brandenburg war übrigens zum Zeitpunkt des Planfeststellungsverfahrens als Direktor der Landesanstalt für Großschutzgebiete für die Stellungnahme des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin zu den Planfeststellungsunterlagen für das neue Schiffshebewerk verantwortlich.

2.4 Planungsbeteiligte

Ohne Anspruch auf die vollständige Nennung aller Nachauftragnehmer waren an der Bau- und Genehmigungsplanung beteiligt:

- Lahmayer International GmbH und Hydroprojekt Ingenieurgesellschaft mbH, heute TRACTEBEL (Generalauftragnehmer (außer Unterer Vorhafen), Koordination, Baugrube, Interaktion Bauwerk/Baugrund, Haustechnik, Oberer Vorhafen, Außenanlagen, Verlegung der Landestraße L29)
- WSI – Werner Sobek AG (Tragwerksplanung Hebewerk, Kanalbrücke mit Widerlager)
- IRS – Stahlwasserbau Consulting AG (Stahlwasserbau (außer Kanalbrücke), Maschinenbau)
- DriveCon GmbH (EMSR-Technik)
- IPP – Technische Gesamtplanung AG (Haustechnik)
- Ingenieurgesellschaft Peil, Ummenhofer mbH (Windbelastung)
- IBAF Engineering (Betriebsfestigkeit Zahnstangengetriebe)
- BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (werkstoffliche Beratung Antriebssystem)
- HELLUX GmbH, heute LUNUX GmbH (Beleuchtung)
- BAW Bundesanstalt für Wasserbau (Baugrundgutachten, konstruktive Gestaltung und Beratung Massivbau, Betontechnologie, Stahlwasserbau, passiver und aktiver Korrosionsschutz)
- BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde (Umweltverträglichkeitsuntersuchung und Landschaftspflegerischer Begleitplan)
- IUS GmbH Mitwirkung Umweltverträglichkeitsstudie
- INROS Lackner SE/ GuD Geotechnik und Consult GmbH (Planung Unterer Vorhafen)
- Pöry Deutschland GmbH (Landschaftspflegerischer Begleitplan Unterer Vorhafen)
- Prüfeningeniurgemeinschaft Krebs+Kiefer GmbH/ Germanischer Lloyd (Gesamtprüfung Entwurfs- und Ausführungsunterlagen)

- SBE Spezialbauengineering GmbH, heute TRACTEBEL (Fachprüfung Entwurfs- und Ausführungsunterlagen im Maschinenbau)
- INROS Lackner SE/ GuD Consult GmbH (Planung Unterer Vorhafen)
- Pöyry Deutschland GmbH (Umweltplanung und Landschaftspflegerischer Begleitplan Unterer Vorhafen)
- Specht, Kalleja und Partner GmbH (Prüfung der Entwurfs- und Ausführungsunterlagen Unterer Vorhafen)

3 Baudurchführung

3.1 Vergabe

Eine Schiffshebewerksanlage kann nur als funktionale Einheit errichtet werden. Der Auftraggeber hat sich dabei bewusst für eine Generalauftragnehmervergabe entschieden. Alle für die Ausführung erforderlichen Fachgewerke wurden daher in das Leistungsverzeichnis integriert und an nur einen Generalauftragnehmer vergeben.

Als gesonderte Baulose wurden lediglich die Baufeldfreimachung, der Bau des Unteren Vorhafens und die Ausführung der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen außerhalb des Baufeldes vergeben.

Im Ergebnis der während der Hochkonjunkturphase von 2007 EU-weit ausgetragenen Bauleistungen wurden die mit dem Generalauftragnehmervertrag zu übernehmenden Risiken durch die Bauindustrie deutlich höher verpreist als durch den Auftraggeber veranschlagt. Zusätzlich musste der Mindestbietende im Ergebnis einer erfolgreich abgeschlossenen Vergabenachprüfung ausgeschieden werden, so dass der Bauauftrag am 18. Mai 2008 mit einem Mehrpreis von rd. 40 Mio. € über dem Mindestbietenden erteilt wurde.

Der damals verantwortliche Bundesverkehrsminister Wolfgang Tiefensee hatte sich entschieden, das geplante Budget für das Bauvorhaben an den von der Bauindustrie kalkulierten Preis anzupassen und eine Finanzierungszusage über Gesamtausgaben von 300 Mio. € gegeben. Das konsequente Festhalten an der Vergabe als Generalauftragnehmervertrag hat jedoch dazu geführt, dass dieses Budget bis einschließlich 2019 nicht noch einmal angepasst werden musste.

Erwähnenswert ist auch, dass die in den Generalauftragnehmervertrag nach der VOB integrierte Vergabe der technischen Bearbeitung der Ausführungsunterlagen die Zahlung einer wertschätzenden Vergütung ermöglichte.

te, die deutlich über dem extrapolierten Höchstsatz der HOAI für eine Ausführungsplanung i. S. der HOAI lag.

3.2 Bauoberleitung

Schon aufgrund seiner bauaufsichtlichen Eigenverantwortung nach § 48 WaStrG, aber auch wegen der langen Bauzeit und der Risiken aus Unternehmensinsolvenzen, hat der Auftraggeber die Bauoberleitung für das Projekt in allen wesentlichen Fachgewerken mindestens einfach redundant mit eigenem Fachpersonal besetzt.

Für Dienstleistung in der juristischen und baubetrieblichen Vertragsabwicklung sowie der Fertigungsüberwachung wurden folgende Projektbeteiligte in der Auftraggeberorganisation beauftragt:

- Ingenieurgemeinschaft IBPM Gesellschaft für interdisziplinäres Bauprojektmanagement mbH und Techdata Projektsteuerung und Projektmanagement im Bauwesen GmbH (Stoff- und Lohnpreisleitung, Termine und Nachträge)
- Sweco GmbH (Montage und Fertigungsüberwachung)
- Stra/lab Baustoff- und Straßenprüfung GmbH (geotechnische Kontrollprüfungen)
- Asphalta Ingenieurgesellschaft für Verkehrsbau mbH, DSB + IQ-Bau GbR (Erstellung eines Bauzeitgutachtens)
- Redeker Sellner Dahs Rechtsanwälte PartG mbH (juristische Beratung)
- Lahmayer International GmbH, heute TRACTEBEL (baubegleitende ingenieurtechnische Beratung)
- Krebs+Kiefer GmbH in Ingenieurgemeinschaft mit Germanischer Lloyd und SBE Spezialbauengineering GmbH (Prüfung der Ausführungsunterlagen und baubegleitende ingenieurtechnische Stellungnahmen)
- DriveCon GmbH (Softwaretestung)
- Bundesanstalt für Wasserbau (Beratung Frischbetonherstellung, passiver und aktiver Korrosionsschutz, Baugrund und Geotechnik, konstruktive Gestaltung)
- Mewes & Partner GmbH (digitaler Anlagenzwillung und virtuelle Inbetriebnahme)

3.3 Bauausführung

Generalauftragnehmer für den Bau der Hebewerksanlage ist die „ARGE Neues Schiffshebewerk Niederfinow“ mit den Unternehmen:

- IMPLenia Construction GmbH (technische Federführung, ZTV-W und ZTV-ING-Koordination, Massivbau und Spezialtiefbau)
- DSD Brückenbau GmbH (kaufmännische Federführung, Stahlbau/Stahlwasserbau)
- Johann Bunte Bauunternehmung GmbH & Co. KG (Erd-, Tief- und Wasserbau sowie Straßen- und Wegebau)
- SIEMAG TECBERG GmbH (Maschinenbau)

Als wichtige Projektbeteiligten der Generalauftragnehmerorganisation sind weiter zu nennen:

- ABB AG (EMSR-Technik)
- WSM Weimarer Spezialmontagen GmbH (Montageleistungen)
- CE-Plan GmbH (CE-Koordination)
- Köber-Plan GmbH (SiGeKo)
- Dr.-Ing. Wolfgang Schreiner (baubetriebliche Betreuung)
- Leinemann & Partner Rechtsanwälte mbH (juristische Beratung)

Zum Leistungsumfang des GU-Vertrages gehören die Technische Bearbeitung der Ausführungsunterlagen nach ZTV-W LB 202, die Herstellung der Baugrube, der Bau des neuen Hebewerkes sowie der zugehörigen Kanalbrücke mit hangseitigem Widerlager, der Bau des Sicherheitstores zum Oberen Vorhafen und die Umverlegung der durch das Baufeld verlaufenden Landesstraße L29.

Generalauftragnehmer für das gesondert vergebene Baulos Unterer Vorhafen ist die Johann Bunte Bauunternehmung GmbH & Co. KG.

3.4 Virtuelle Inbetriebnahme

Schon seit über 10 Jahren beschäftigt sich das Wasserstraßen-Neubauamt Berlin in Zusammenarbeit mit der ehemaligen Fachstelle für Verkehrstechnik in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes mit dem Thema der virtuellen Inbetriebnahme.

Die physische Inbetriebnahme einer realen Anlage kann stets erst nach deren Fertigstellung beginnen. Die hohe Komplexität und die Sicherheitsanforderungen einer Schiffshebewerksanlage bewirken dabei einen hohen Testbedarf unter schwierigen Vor-Ort-Bedingungen. Nacharbeiten oder der Austausch einzelner Anlagenbaukomponenten sind nur mit hohem baulichem und zeitlichem Aufwand möglich.

Eine virtuelle Inbetriebnahme erfolgt dagegen an einem digitalen Zwilling, der es ermöglicht, die programmierte Software im Zusammenwirken mit der eingesetzten Sensorik und den eingesetzten Anlagenkomponenten in einer 3D-Echtzeitsimulation zu testen, noch bevor die Bauteile überhaupt auf die Baustelle kommen. Neben sämtlichen Betriebsarten können dabei auch die Folgen von Fehlbedienungen und aller denkbaren Störfälle simuliert werden. Nicht zuletzt kann auch die Schulung des Bedienpersonals schon beginnen, bevor die eigentliche Anlage fertig gestellt ist.

Für den Neubau des neuen Schiffshebewerkes Niederfinow hat der Auftraggeber mit der Mewes & Partner GmbH einen langjährig erfahrenen Dienstleister aus der Industrieanlagenautomation damit beauftragt, die 3D-Anlagensimulation zu erstellen und die eingesetzten System- und Softwarekomponenten zu testen.

Funktionsrisiken sowie Qualitätsmängel und Bauzeitverzögerungen durch aufwendige Nacharbeiten vor Ort konnten so weitgehend minimiert werden. Die Aufwendungen für die virtuelle Inbetriebnahme belaufen sich auf weniger als 0,1% der Investitionskosten.

Begünstigend für die Qualitätssicherung hat der Auftraggeber darüber hinaus auch die herstellerseitige Werkserprobung aller wesentlichen Maschinenbauteile gefordert und vergütet.

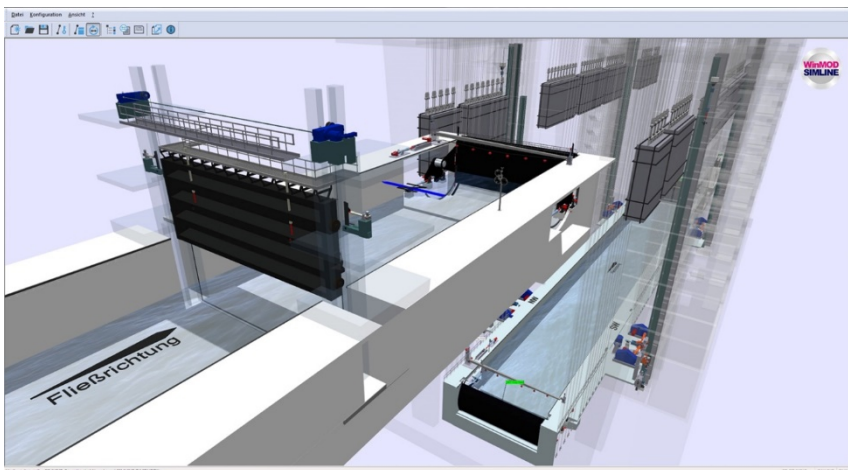


Abbildung 2: Virtueller Zwilling SHW Niederfinow, Detailansicht Sicherheitstor

4 Öffentlichkeitsarbeit

Mit durchschnittlich 150.000 Besuchern pro Jahr zählt das Schiffshebewerk Niederfinow auch zu den herausragenden touristischen Attraktionen im Land Brandenburg.

Als Teil einer identitätsstiftenden Öffentlichkeitsarbeit hatte sich die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes daher frühzeitig entschieden vor Ort ein modernes Baustelleninformationszentrum zu errichten um dort baubegleitend und zeitgemäß über das Projekt und den jeweils aktuellen Bautenstand zu informieren.

Verantwortlich für die konstruktive Gestaltung des Informationszentrums zeichnete dabei erneut der Architekt Udo Beuke von der Bundesanstalt für Wasserbau. Die Ausstellung wurde von der eckedesign GmbH in Zusammenarbeit mit Thomas Mengel gestaltet.

Autor:

Dipl.-Ing. Rolf Dietrich

Wasserstraßen-Neubauamt Berlin
Mehringdamm 129
10965 Berlin

Tel.: +49 30 69580400
Fax: +49 30 69580405
E-Mail: rolf.dietrich@wsv.bund.de

PREVIEW – Steigerung der Resilienz von Wasserstraßen

Jörg Bödefeld
Francesca Marsili
Jan Akkermann
Simon Weiler

Das Verbundprojekt PREVIEW hat sich zum Ziel gesetzt, die Resilienz der Wasserstraßeninfrastruktur in Deutschland zu erhöhen. Zu diesem Zweck erforschen fünf Verbundpartner über eine Laufzeit von drei Jahren die möglichen Auswirkungen des Versagens kritischer Bauwerke der Wasserverkehrsinfrastruktur auf andere Verkehrsinfrastrukturen, auf die Logistik, auf Anrainerindustrien sowie auf die Bevölkerung der angrenzenden Regionen im Rahmen eines ganzheitlichen Risikomanagement-Ansatzes.

Stichworte: Risiko, Resilienz, Vulnerabilität, Kritikalität

1 Einführung

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Verbundprojekt PREVIEW verfolgt das Ziel, die Widerstandsfähigkeit der Wasserstraßeninfrastruktur gegenüber Gefahr auslösenden Ereignissen aus den Kategorien technisch/menschliches Versagen, Naturereignisse und Terrorangriff zu erhöhen. Zu diesem Zweck erforschen fünf Verbundpartner über eine Laufzeit von drei Jahren die Eintrittswahrscheinlichkeit und mögliche Auswirkungen des Versagens von Bauwerken der Wasserverkehrsinfrastruktur. Vom Versagen betroffen können andere Verkehrsinfrastrukturen, die Logistik, Anrainerindustrien sowie die Bevölkerung der angrenzenden Regionen sein. Ziel ist eine Betrachtung im Rahmen eines ganzheitlichen Risikomanagement-Ansatzes zur Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen und zur Entwicklung von Handlungsempfehlungen für den Versagensfall. Beispielregion für die Untersuchungen ist das Westdeutsche Kanalnetz mit dem Wesel-Datteln-Kanal, dem Rhein-Herne-Kanal, dem Dortmund-Ems-Kanal, dem Datteln-Hamm-Kanal und der Ruhr, s. Abbildung 1.

Das Projekt ist im Bereich der zivilen Sicherheitsforschung angesiedelt und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Die Projektpartner sind das Karlsruher Institut für Technologie, die Hochschule Karlsruhe für Wirtschaft und Technik, die antwortING Beratende Ingenieure PartGmbH, die 4flow AG sowie die Bundesanstalt für Wasserbau.

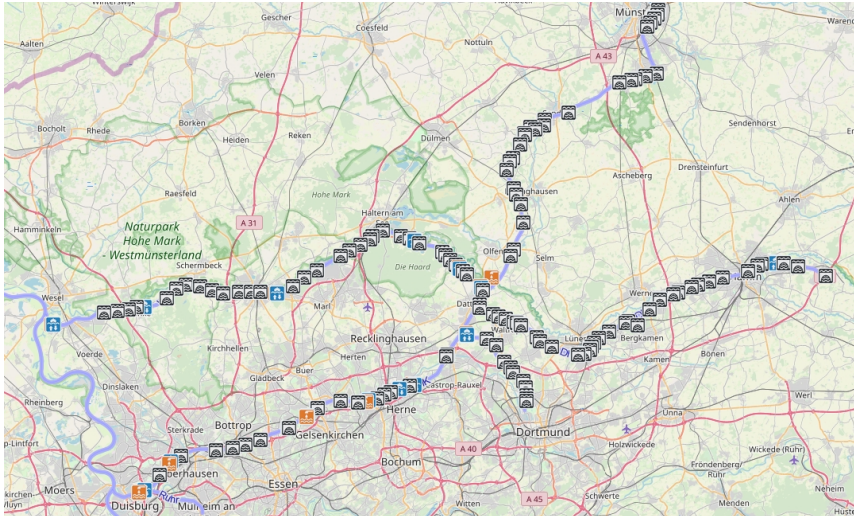


Abbildung 1: Schleusen, Pumpwerke, Dürer und Durchlässe im Untersuchungsgebiet

2 Konzept

Ein erstes Ergebnis der Arbeiten ist der in Abbildung 2 dargestellte, prozessorientierten Risiko-Ansatz, der in verschiedenen Ebenen abgebildet wird.

Auslöser der Prozesskette ist ein Ereignis aus den in der Sicherheitsforschung üblichen, eingangs erwähnten Kategorien. Das Ereignis wird zu einer Gefahr, die als Einwirkung auf das System wirkt. Die Antwort des Systems darauf wird durch seine Vulnerabilität bestimmt. Die Systemantwort wird wiederum zu einer Gefährdung für das System, das darauf mit Konsequenzen reagiert. Die Art der Reaktion wird durch die Kritikalität des Systems bestimmt.

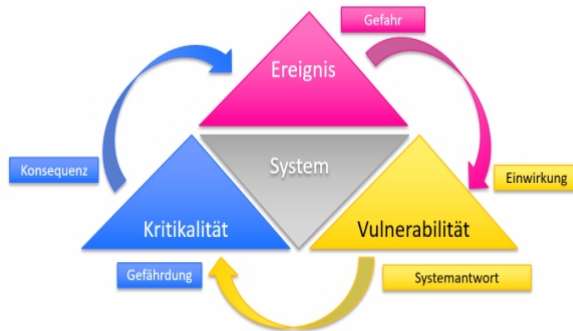


Abbildung 2: Risiko als Prozesskette

Als Maß für das Risiko wird im Allgemeinen das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines negativen Ereignisses und das Ausmaß seiner Konsequenzen ermittelt, Hauptmanns et al. (1987). Im Sinne der Prozesskette handelt es sich dabei um die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefährdung des Systems, die die Wahrscheinlichkeit eines auslösenden Ereignisses und die Wahrscheinlichkeit einer negativen Systemantwort subsummiert, und den sich auf Grund der Kritikalität ergebenden Konsequenzen.

2.1 Ereignis

Zu den Naturereignissen zählen Starkregenereignisse mit einhergehenden Überschwemmungen ebenso wie lang anhaltende Dürrezeiten mit niedrigen Wasserständen in den Wasserstraßen. Erste Analysen ergeben ein eher robustes Verhalten des Westdeutschen Kanalnetzes gegenüber diesen Ereignissen, maßgeblich durch die relative Unabhängigkeit von natürlichen Flüssen und durch die Möglichkeit, das Wasserangebot durch umfangreiche Pumpleistungen im Bereich des Kanalnetzes künstlich zu beeinflussen.

Terrorangriffe haben das Ziel, mit möglichst geringem Aufwand eine große Anzahl von Opfern zu erreichen. Auch dafür scheint das Westdeutsche Kanalnetz nicht sehr exponiert zu sein, da es zum einen größeren Aufwands bedarf, einen entsprechenden Schaden an einem Verkehrswasserbauwerk zu erzeugen. Zum anderen treten die Auswirkungen, z. B. in Form einer unterbrochenen Logistikkette oder von unregulierten Wasserständen, eher mit größerer zeitlicher Verzögerung auf.

Zur Kategorie technisch/menschliches Versagen wird in diesem Kontext auch die verzögerte Instandhaltung, die durch die Überalterung und den schlechten Zustand der Verkehrswasserbauwerke deutlich wird, verstanden. Zusammen mit Unfällen z. B. in Form von Schiffsanfahrungen oder Fehlbedienungen scheint dies die größte Relevanz im Untersuchungsgebiet zu haben.

2.2 Vulnerabilität

Die Vulnerabilität beschreibt als Systemkennwert wie ebendieses System auf eine bestimmte Einwirkung reagiert. Während ein vulnerables System eher stark – bis hin zur Dysfunktion – auf Einwirkungen reagiert, widersteht ein gering vulnerables System den gleichen Einwirkungen eher tolerant. Auf Bauwerksebene ist ein robustes Bauwerk z. B. ein gering vulnerables System, wohingegen ein Bauwerk mit großen Schäden und schlechtem Zustand ein eher vulnerables Bauwerk ist.

2.3 Kritikalität

Mit der Kritikalität des Systems kann bestimmt werden, welche Konsequenzen die aus der Systemantwort resultierende Gefährdung bedingt. Bei einer Überflutung hat eine besiedelte Fläche beispielsweise eine höhere Kritikalität als eine Naturfläche, da Menschenleben bedroht sein können.

2.4 Systemverständnis

Die beschriebene Prozesskette kann auf verschiedenen Systemebenen ablaufen, siehe Abbildung 3. Dabei beschreiben die Kennwerte Vulnerabilität und Kritikalität auch die Komponenten der unterschiedlichen Ebenen.

Als kleinste Ebene wird dabei ein Bauteil betrachtet. Beispielsweise kann eine Schiffsanfahrung gegen ein Schleusentor einen Stoß auf den Riegel der Torkonstruktion zur Folge haben. Dieser reagiert aufgrund seiner hohen statischen Auslastung (hohe Vulnerabilität) mit Versagen. Da der Riegel ein für das Tragverhalten relevantes Bauteil ist (hohe Kritikalität), fällt in der Folge das Schleusentor aus.

Die Konsequenz einer unteren Ebene führt dann zu einem Ereignis auf der nächst höheren Ebene, womit die Prozesskette erneut in Gang gesetzt wird.

Da die Schleusenkammer in jedem Haupt nur über ein Tor verfügt (hohe Vulnerabilität) führt der Ausfall des Schleusentores auf Bauwerksebene zu einer Sperrung der Schleusenkammer.

Da die Schleusenanlage zwei Kammern hat (geringe Kritikalität) führt die Sperrung der einen Schleusenkammer nur zu einer Teilspernung des Verkehrs.

Die Teilspernung der Schleuse ist wiederum eine Einwirkung auf Ebene des Wasserstraßennetzes, die über die Vulnerabilität und Kritikalität des Netzes beispielsweise zu Versorgungsengpässen führen kann.

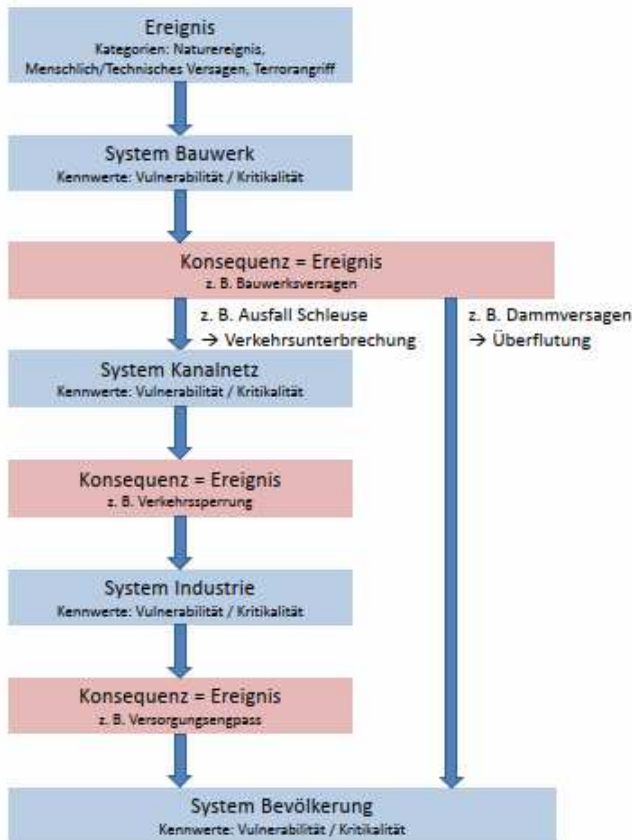


Abbildung 3: Verschiedene Betrachtungsebenen

3 Anwendung auf Bauwerksebene

3.1 Relevante Ereignisse

In Abschnitt 2.1 wurde bereits erläutert, dass das Alter und der Zustand der Infrastruktur die größte Gefährdung im Hinblick auf ein Versagen der Bauwerke darstellt. Abbildung 4 zeigt die Altersstruktur der 17 Schleusenanlagen im Untersuchungsgebiet. Dabei fallen drei Alterskohorten auf: 11 Anlagen sind zwischen 80 und 110 Jahre alt und haben damit ihre angesetzte technische Nutzungsdauer nahezu erreicht, 5 Anlagen sind im mittleren Alter zwischen 20 und 50 Jahre alt und nur eine Anlage ist neu.

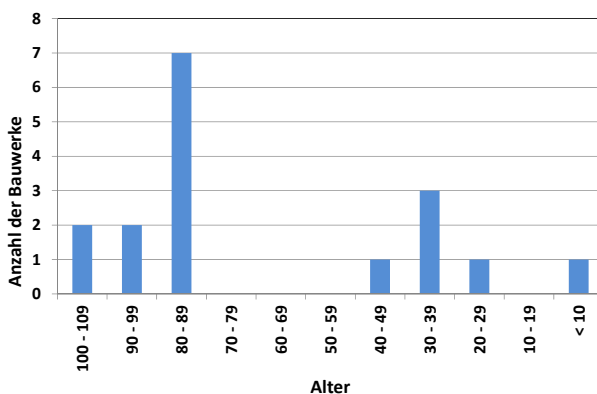


Abbildung 4: Altersstruktur der Schiffsschleusen im Untersuchungsgebiet

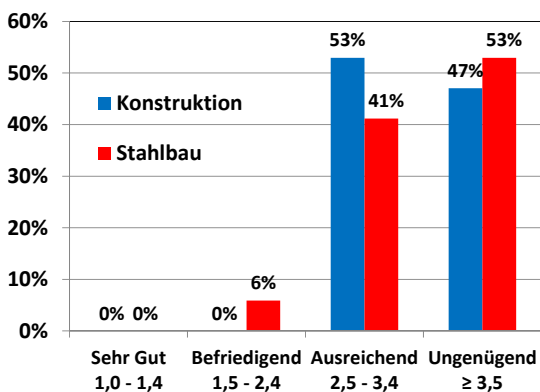


Abbildung 5: Teilnoten der Schiffsschleusen im Untersuchungsgebiet

Aus den im Rahmen regelmäßiger Bauwerksinspektionen dokumentierten Schäden werden Kennzahlen für den Zustand generiert, die einen ersten Eindruck für die Dringlichkeit von Instandhaltungsmaßnahmen geben. Basis dafür ist die Bewertung der erfassten Einzelschäden gemäß BAW (2018).

Die Kennzahlen reichen von 1 bis 4, wobei 1 einen sehr guten Zustand und 4 dringenden Handlungsbedarf anzeigt. Für die 17 Schleusenanlagen sind die Teilnoten für die Konstruktion und die Stahlbauteile angegeben. Es überrascht der sehr schlechte Zustand, der bei den Schleusen mittleren Alters auf die bei der Planung der Tore nicht berücksichtigte Ermüdungsfestigkeit zurück zu führen ist.

3.2 Robustheit als Ansatz für die Vulnerabilität

Die Vulnerabilität eines Bauwerks kann nicht alleine durch dessen Schädigungszustand beschrieben werden, da die Bauwerke auf Grund großer Unterschiede in Konstruktionsform, Material und Bauweise unterschiedlich robust auf Schädigungen reagieren. Sind beispielsweise Möglichkeiten der Lastumlagerung gegeben, muss eine Schädigung nicht zwingend zu einem Versagen der Konstruktion führen. Abbildung 6 zeigt schematisch das unterschiedliche Verhalten von robusten und weniger robusten Bauwerken unter fortschreitender Schädigung.

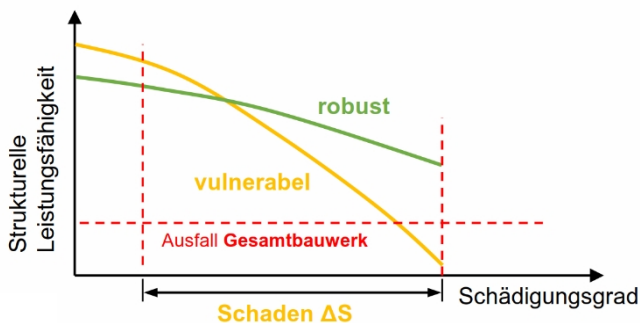


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Robustheit

Mit einem in Akkermann et al. (2018) beschriebenen Verfahren kann für Schleusenquerschnitte auf Basis des Auslastungsgrades und zusätzlicher Kriterien wie beispielsweise Redundanz und Duktilität eine Kennzahl für die Robustheit ermittelt werden. Die Überlagerung mit den erfassten Schäden führt zu einem Schadensindex, der damit ein erster Indikator für die Vulnerabilität des Bauwerks ist.

Vergleichsberechnungen belegen, dass Effekte wie die bekannte Robustheit unbewehrter Konstruktionen ebenso erfasst wird wie die Anfälligkeit hoch ausgelasteter, mit vielen Öffnungen durchdrungener Stahlbetonquerschnitte.

Im westdeutschen Kanalnetz wurden neben Schleusen 10 weitere Objektarten mit Relevanz für das Untersuchungsthema identifiziert. Dazu zählen neben Dückern und Durchlässen insbesondere auch die Kanalseitendämme sowie die für die Wasserverteilung relevanten Speisungspumpwerke. Für diese Bauwerke werden aktuell Vulnerabilitätsansätze entwickelt.

3.3 Bestimmung der Kritikalität über die Funktion

Die Kritikalität ergibt sich bei Bauwerken über deren Funktion, da sich daraus die Konsequenzen bei Versagen ableiten lassen. Auf Basis einer Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (BMVI, 2017), in der die Objektarten der WSV definiert und klassifiziert sind, lassen sich fünf Funktionskriterien formulieren: wasserhaltend, wasserstandsregelnd, verkehrsrelevant, sichernd und querend.

Den identifizierten Objektarten lassen sich diese Funktionskriterien zuordnen. Beispielsweise hat ein Speisungspumpwerk wasserstandsregelnde und verkehrsrelevante Funktionen, woraus sich ableiten lässt, dass bei einem Versagen als Konsequenz unkontrollierte Wasserstände und Verkehrsunterbrechungen auftreten können. Demgegenüber hat ein Durchlass querende und wasserhaltende Funktionen, womit im Versagensfall die Querung gestört ist und auch die Gefahr des Leerlaufens der Haltung besteht, da der Durchlass das Gewässerbett stützt.

Aktuell werden auf Basis der identifizierten Objektarten und deren Funktionen in Überlagerung mit realistischen Ereignissen Szenarien definiert, die im weiteren Gegenstand der Untersuchungen sind.

3.4 Risikomatrix

Zur Beschreibung des Risikos sind Utility-Funktionen in Matrixform geeignet (Holt et al, 2014), siehe beispielhaft Abbildung 7. Die qualitative Beschreibung der Risiko-Kenngrößen vereinfacht die Berücksichtigung unterschiedlichster Objektarten, Systeme, Szenarien und Konsequenzen. Auch können die unterschiedlichen Systemebenen mit nacheinander angeordneten Utility-Funktionen beschrieben werden. Final ist eine GIS-unterstützte Darstellung der Ergebnisse in einer Karte eine geeignete Form der Risiko-Kommunikation.

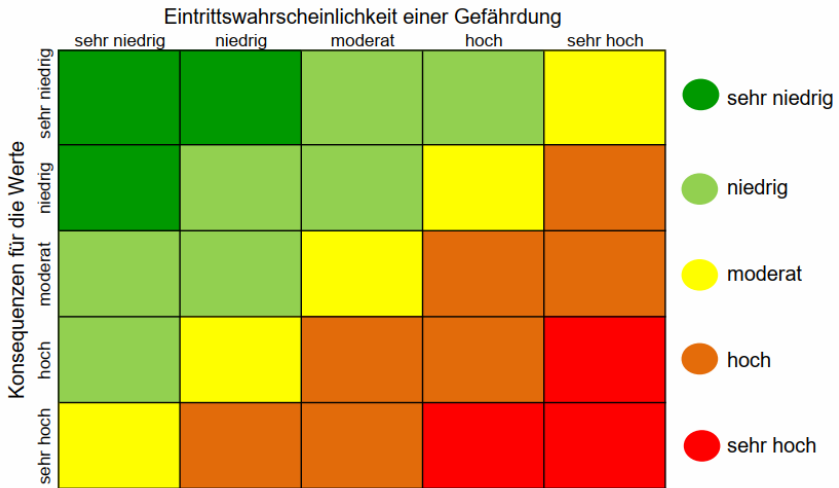


Abbildung 7: Round Out-Utility-Funktion (Holt et al., 2014)

4 Ausblick

Die Risikoanalyse sollte weiterentwickelt und in eine Resilienzbewertung integriert werden. Resilienz kann definiert werden als die Fähigkeit des Systems, seine Grundfunktionalität nach einem Ereignis aufrechtzuerhalten oder wiederherzustellen. Da das Wasserstraßensystem mehrere Funktionen hat, die Werte für verschiedene Akteure darstellen, liefert die Resilienzbewertung Einblicke und Orientierungshilfen für mehrdimensionale Entscheidungen sowie für die Lösung auftretender Zielkonflikte.

Auf verschiedenen Systemebenen sollten Maßnahmen ergriffen werden, die auf verschiedene Schritte des beschriebenen Risikoprozesses zielen:

- Reduzierung der negativen Auswirkungen eines störenden Ereignisses
- Reduktion der Vulnerabilität
- Reduktion der Kritikalität

Beispiele für solche Maßnahmen sind Bauwerksverstärkungen (Vulnerabilität auf Bauwerksebene) oder zielgerichtete Notfallvorsorgeplanungen (Kritikalität auf Bauwerksebene). Angesichts des Alters der Objekte und der Schäden, die sie betreffen, ist es besonders wichtig, dass die Instandhaltungsressourcen optimal eingesetzt werden. Das bedeutet, dass die In-

standhaltungsmaßnahmen, die über die damit verbundene Reduktion der Vulnerabilität die größte Auswirkung auf die Resilienz des gesamten Systems haben, priorisiert werden müssen.

5 Literatur

- Akkermann et al. (2018): Die Bauwerksrobustheit im Kontext eines risikobasierten Erhaltungsmanagements. In: Beton- und Stahlbetonbau, 23 (2018), p. 716-726.
- BAW (2018): BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2018
- BMVI (2014): VV-WSV 1102 Objektkatalog. Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2014.
- Hauptmanns, U.; Werner, W.; Herttrich, M. (1987): Technische Risiken. Ermittlung und Beurteilung. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- Holt et al. (2014): Eliciting and Combining Decision Criteria Using a Limited Palette of Utility Functions and Uncertainty Distributions: Illustrated by Application to Pest Risk Analysis, Risk Analysis, Vol. 32, No. 1.

Autoren:

Dr.-Ing. Jörg Bödefeld
Dr.-Ing. Francesca Marsili

Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann
Simon Weiler M.Eng.

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Bautechnik
Referat Infrastrukturmanagement
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Hochschule Technik und Wirtschaft
Institut für Angewandte Forschung
Moltkestraße 30
76133 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726 3140
Fax: +49 721 9726 4540
E-Mail: joerg.boedefeld@baw.de
francesca.marsili@baw.de

Tel.: +49 721 925 2627
Fax: +49 721 925 2645
E-Mail: jan.akkermann@hs-karlsruhe.de
Simon.weiler@hs-karlsruhe.de

Durch prozessgestütztes, digitales Gewässermanagement zur qualitäts- gesicherten Maßnahmenumsetzung

Andreas Stowasser

Die im Rahmen des BMBF Verbundprojekts „In_StröHmunG“ entwickelte Gewässermanagement-Software PROGEMIS® unterstützt und erleichtert die Aufstellung und Umsetzung von Gewässerunterhaltungs- und entwicklungskonzepten. Sie ist eine moderne Managementlösung für die qualitätsgesicherte Planung, Ausführung, Dokumentation und Fortschreibung von Maßnahmen zur Gewässerunterhaltung und -entwicklung auf Basis eines differenzierten Maßnahmenkatalogs. Der Maßnahmenkatalog beinhaltet ausführliche Maßnahmenbeschreibungen und Detailinformationen. Damit kann die Qualität bei Planung und Ausführung von Unterhaltungs- und Entwicklungsmaßnahmen gesichert und verbessert werden.

Stichworte: Digitales Gewässermanagement, Gewässerunterhaltung, Gewässerentwicklung, Maßnahmenkatalog, Maßnahmenplanung, Qualitätssicherung

1 Digitales Gewässermanagement mit PROGEMIS®

Mit der Software PROGEMIS® wurde ein **PRO**zessgestütztes **GE**wässer**Ma**nagement- und **I**nformations**S**ystem entwickelt, das Unterhaltungslastträger wie Städte, Gemeinden und Verbände bei Gewässerunterhaltung und -entwicklung unterstützt. Sie legt dabei zunächst den Fokus auf eine ökologisch ausgerichtete Gewässerunterhaltung mit integrierter Verringerung von Hochwasserrisiken. Derzeit besteht eine Basisversion, deren Grundzüge im Rahmen des BMBF Verbundprojekts „In_StröHmunG“ (vgl. DWA, 2018) entwickelt wurden. Die Basisversion umfasst hauptsächlich die Arbeitsplanung und Dokumentation von Routine- und Entwicklungsmaßnahmen. Im Rahmen einer agilen Softwareentwicklung kann diese Basisversion von PROGEMIS® jeweils an die spezifischen Kundenanforderungen angepasst und weiterent-

wickelt werden. Kernstück von PROGEMIS® ist ein umfangreicher Maßnahmenkatalog, in dem Maßnahmen zur Gewässerunterhaltung und -entwicklung nach einem einheitlichen Prinzip detailliert beschrieben sind. Durch Zugriff auf Maßnahmenbeschreibungen sind jederzeit sämtliche Informationen zu allen Aspekten, Wirkungsweise und Details der Maßnahme verfügbar. Das Risiko von Planungs- und Ausführungsfehlern aufgrund fehlender oder fachlich unvollständiger Informationen wird dadurch reduziert.

Die Anwendung ist eine „Software as a Service“ Lösung und kann sowohl am PC als auch mobil auf Tablet oder Smartphone ohne zusätzlichen Installationsaufwand im Webbrowser genutzt werden. Maßnahmen lassen sich damit flexibel und ortsunabhängig planen, Ausführungsdetails bei Bedarf vor Ort nachlesen und die Umsetzung direkt am Gewässer mit wenig Aufwand dokumentieren.

2 Der Regelkreislauf zur kontinuierlichen Planfortschreibung

PROGEMIS® beinhaltet im Kern einen Regelkreislauf (vgl. Abbildung 1), der auf Grundlage konsistenter Daten und eindeutiger Prozessabläufe eine kontinuierliche Fortschreibung bzw. Aktualisierung von Daten und Informationen ermöglicht. Ergebnis ist ein sich im Zuge der Planung und Umsetzung kontinuierlich fortschreibender Unterhaltungs- bzw. Entwicklungsplan. Der Regelkreislauf umfasst einen Basisplan, einen flexibel für einen bestimmten Zeitraum (z. B. Woche, Monat, Jahr) aufzustellenden Arbeitsplan und einer fortlaufenden Dokumentation umgesetzter Maßnahmen im Zuge der Ausführung. Über die softwaregestützte Abbildung der maßgeblichen Prozesse ermöglicht der Daten- und Informationsfluss im Regelkreislauf eine kontinuierliche Planfortschreibung und -verbesserung.

Dabei ist es nicht erforderlich, dass immer ein vollständiger und ausgereifter Basisplan zu Grunde liegt. Vielmehr kann auch mit der Dokumentation ausgeführter (Routine-) Unterhaltungsmaßnahmen begonnen und das System schrittweise, z. B. Jahr für Jahr, über die Arbeitsplanung bis zum Basisplan aufgebaut und erweitert werden.

Die Grundversion von PROGEMIS® umfasst daher zunächst den Maßnahmenkatalog sowie die Funktionen zum Anlegen und Dokumentieren von Maßnahmen.

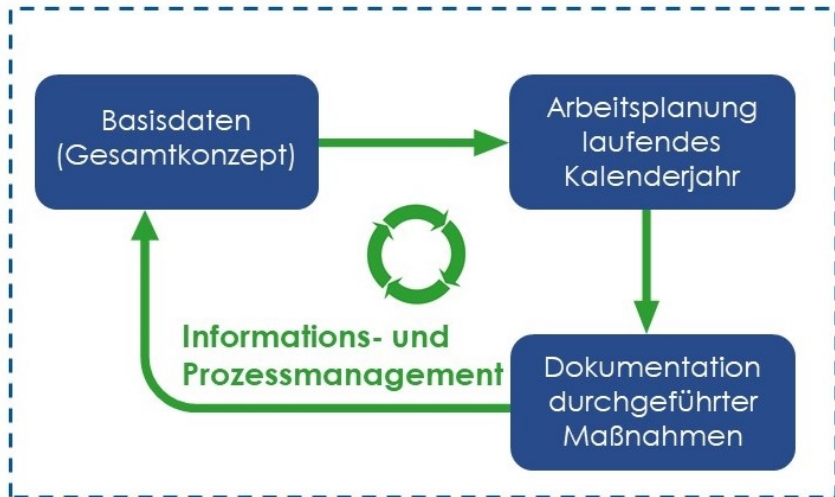


Abbildung 1: Regelkreislauf der Gewässermanagementsoftware PROGEMIS®

Sofern der Kunde in seinem Zuständigkeitsbereich oder einem Gewässerabschnitt bereits über Unterhaltungspläne und / oder Entwicklungspläne verfügt, können im Rahmen agiler Softwareentwicklung kundenspezifisch die Funktionen des Basisplans hinzugefügt werden. Im Basisplan legt der zuständige Gewässermanager Maßnahmen(-pakete) fest, die beispielsweise auf die Erreichung des guten ökologischen Gewässerzustands gemäß WRRL oder die Gewährleistung der Abflussfunktion zum Schutz von Bebauung und Infrastruktur hinwirken.

Auf Grundlage des Basisplans kann der Gewässermanager im Arbeitsplan alle Maßnahmen für den aktuellen Zeitraum (z.B. Monat, Quartal, Jahr) gemäß verfügbarem Budget aus den Basisplanmaßnahmen zusammenstellen. Er kann dabei Maßnahmen zu Aufträgen bündeln und Ausführenden zuweisen.

In der Grundversion können bereits Ausführende (Bauhöfe, Firmen oder Anlieger) auf die Ihnen zugewiesenen Aufträge und/oder Maßnahmen über einen passwortgeschützten Zugang auf PROGEMIS® zugreifen. Detaillierte Ausführungsinfos zu den jeweiligen Maßnahmen sind mobil während der Ausführung abrufbar. Die Dokumentation ausgeführter Maßnahmen kann per Smartphone oder Tablet mit wenigen Eingaben, Fotos bzw. Sprachnachricht erfolgen.

3 Systematische und qualitätssichernde Maßnahmenbeschreibungen – der PROGEMIS® Maßnahmenkatalog

3.1 Aufbau und Umfang des Maßnahmenkatalogs

Die Qualität der Maßnahmenumsetzung wird durch praxisgerecht und anwenderfreundlich aufbereitetes Fachwissen unterstützt, das in einem differenzierten Maßnahmenkatalog hinterlegt ist. Im Maßnahmenkatalog sind die Maßnahmen jeweils in einheitlich aufgebauten Maßnahmenblättern mit detaillierten Beschreibungen und Abbildungen aufbereitet (vgl. Kap. 3.2).

Der Maßnahmenkatalog ist nach dem Grundprinzip eines Standardleistungskatalogs aufgebaut, wobei der Detailierungsgrad der Inhalte und Beschreibungen von Maßnahmengruppe über den jeweiligen Maßnahmentyp bis hin zu verschiedenen Ausführungsvarianten immer mehr zunimmt. Dieser Aufbau des Maßnahmenkatalogs ermöglicht eine differenzierte Zuordnung von Kosten und Ausführungsinformationen je nach Maßnahmenebene (vgl. Abbildung 2).

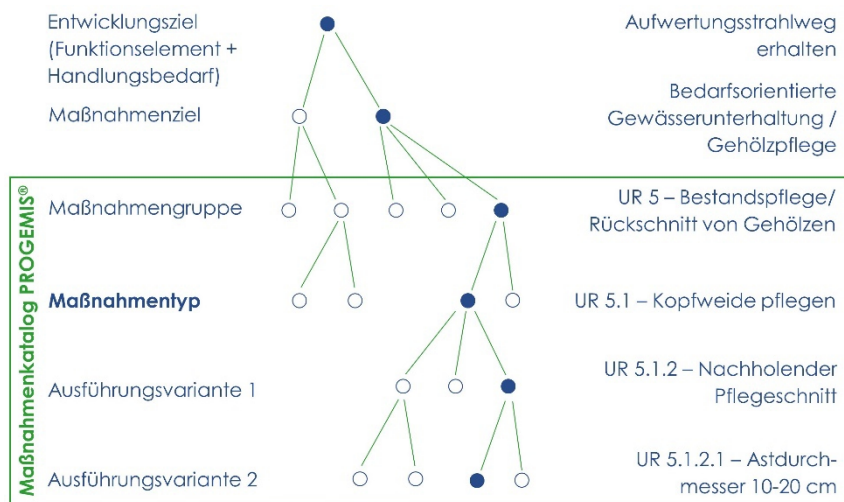


Abbildung 2: Aufbau des PROGEMIS® Maßnahmenkatalogs

Im Maßnahmenkatalog sind die Maßnahmen übersichtlich in vier Kategorien gegliedert: „Sohle“ (S), „Ufer“ (U), „Ufer/Randstreifen“ (U/R) und „Kontrollen, Schutzmaßnahmen & Abflusshindernisse“ (K).

Dementsprechend umfasst der Maßnahmenkatalog folgende Maßnahmengruppen, die dann wiederum nach Maßnahmentypen und Ausführungsvarianten unterteilt sind (vgl. Abbildung 2):

Tabelle 1: Umfang Maßnahmenkatalog PROGEMIS® - Maßnahmengruppen

Bereich	Nr.	Maßnahmengruppe
Sohle	S 1	Sohlaufwuchs entfernen
	S 2	Räumen, Managen von Sediment/Schlamm
	S 3	Anlegen naturnaher Sohl- und Laufstrukturen
	S 4	Sohlsicherung naturnah
	S 5	Rückbau Sohlbefestigung
	S 6	Umbau, Rückbau Bauwerk (Durchgängigkeit herstellen)
Ufer	U 7	Ufersicherung mit ingenieurb biologischen Bauweisen
	U 8	Anlegen und Initiieren naturnaher Uferstrukturen
	U 9	Initiales Aufbrechen & Entfernen von Ufersicherung
	U 10	Rückbau Uferbefestigung
	U 11	Erdarbeiten
	U 12	Instandhaltung von Anlagen und Uferverbau
Ufer / Randstreifen	U / R 1	Mähen
	U / R 2	Neophyten bekämpfen (krautige Arten)
	U / R 3	Entnehmen / Verdrängen standortfremder und ggf. invasiver Gehölze
	U / R 4	Pflege zur Entwicklung von Gehölzbeständen
	U / R 5	Bestandspflege / Rückschnitt von Gehölzen

Bereich	Nr.	Maßnahmengruppe
	U / R 6	Anlegen von Vegetationsbeständen
Kontrolle	K 1	Gewässerzustandskontrolle, beobachtende Unterhaltung, Schadensaufnahme
	K 2	Biber & Bisam, Wild & Weidetiere managen
	K 3	Totholz und Treibgut managen
	K 4	Unbrauchbare Stoffe/Abfall verwerten
	K 5	Verkehrssicherung

3.2 Struktur und Inhalt der Maßnahmenblätter

Die Maßnahmenblätter sind entsprechend der Datenbankstruktur von PROGEMIS® einheitlich aufgebaut und strukturiert. Sie enthalten jeweils Basisinformationen, eine Kurzbeschreibung, Voraussetzungen und Folgen der Maßnahme, Angaben zur Ausführung, wie z. B. Zeitraum, Turnus, Kosten, Geräteeinsatz und naturschutzrechtliche Hinweise sowie Erläuterungen zur Wirkungsweise, zur Bedeutung für Gewässerökologie und für den Hochwasserschutz sowie mit der Maßnahme verbundene Ökosystemleistungen.

Der Maßnahmenkatalog und die darin enthaltenen Maßnahmenblätter mit ihren differenzierten und umfangreichen Maßnahmenbeschreibungen gewährleisten jederzeit Zugriff auf sämtliche Informationen zu allen Aspekten, Wirkungsweise und Details der Maßnahmen. Sie tragen damit maßgeblich zur Qualitätssicherung bei der Maßnahmenumsetzung bei. Beispielsweise werden Ausführungsfehler durch die praxisgerechte Darstellung wichtiger Arbeitsschritte reduziert und gleichzeitig eindeutige Qualitätsanforderungen definiert (vgl. Abbildung 3).

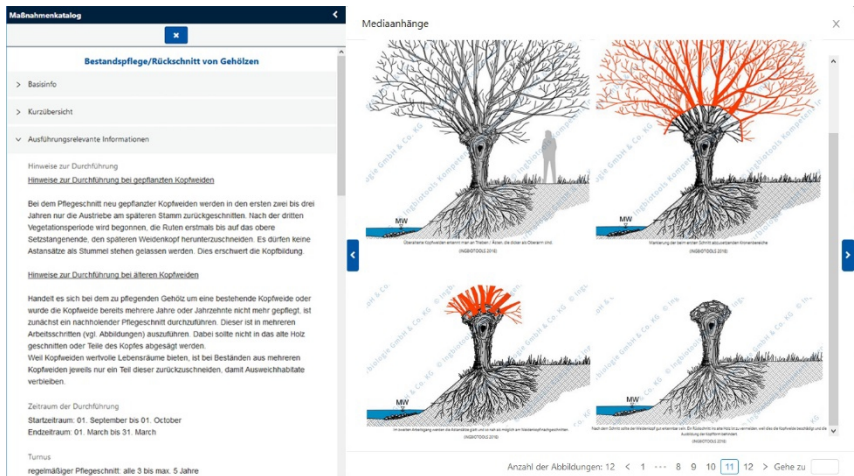


Abbildung 3: Auszug PROGEMIS® Maßnahmenkatalog – Maßnahme U/R 5.1 Kopfweiden pflegen

Die Maßnahmenblätter enthalten je Maßnahme Basisinformationen (z. B. Titel, Kategorie, Symbol), eine Kurzübersicht (z. B. Ziele, Kurzbeschreibung), Angaben zu Voraussetzungen und Folgen (z. B. Anforderungen an Bestand, Mindestlänge, Folgemaßnahmen), Informationen zur Ausführung (z. B. Detailzeichnungen der Arbeitsschritte, Zeitraum, Turnus der Durchführung, Kosten, Geräteeinsatz etc.) sowie zur Wirkungsweise der Maßnahme (z. B. Wirkungsdauer, Bedeutung für Gewässerstruktur, Naturschutz, Hochwasserschutz).

Damit alle Akteure gemäß ihren Aufgaben und Verantwortlichkeiten in die Planung und Umsetzung von Maßnahmen eingebunden werden können, ist PROGEMIS® mit einem differenzierten Rollen- und Rechtemanagement ausgestattet. Damit können sowohl Nutzerführung in Form von verfügbaren Programmfunktionen als auch Art und Umfang der bereit gestellten Informationen entsprechend des Aufgabenbereichs der jeweiligen Nutzer angepasst werden. Dies bedeutet, dass jeder Nutzer genau die Informationen angezeigt bekommt, die zur Erfüllung seiner Aufgaben sinnvoll bzw. erforderlich sind. So werden je Nutzergruppe nur die jeweils benötigten Informationen eines Maßnahmenblattes angezeigt. Beispielsweise sehen Ausführende nur die für sie zur Umsetzung vorgesehenen Maßnahmen mit den dazugehörigen Ausführungsinformationen bzw. Detailangaben aus den Maßnahmenblättern.

4 Maßnahmenplanung und -dokumentation

Bei der Planung und Dokumentation von Maßnahmen im PROGEMIS® wird die benötigte Maßnahmengruppe oder der Maßnahmentyp aus dem Maßnahmenkatalog gewählt. Damit ist eine einheitliche Nomenklatur der Maßnahmenbezeichnung gewährleistet. Bei Bedarf können spezifische Erläuterungen zur Maßnahme durch Freitexteingaben in dafür vorgesehen Eingabefelder ergänzt werden.

Das Anlegen oder Dokumentieren einer Maßnahme kann aus einer Tabellenansicht oder aus einer Maßnahmendetailansicht heraus gestartet werden. Der Tabellen- und der Detailansicht ist im Programm eine parallele Kartenansicht nebenangestellt. So können Interaktionen zwischen Sachdaten der Maßnahmen und der Kartendarstellung einfach erfasst und bedient werden. Maßnahmen können schnell im Lageplan der Kartenansicht aufgefunden, analysiert oder angepasst werden.

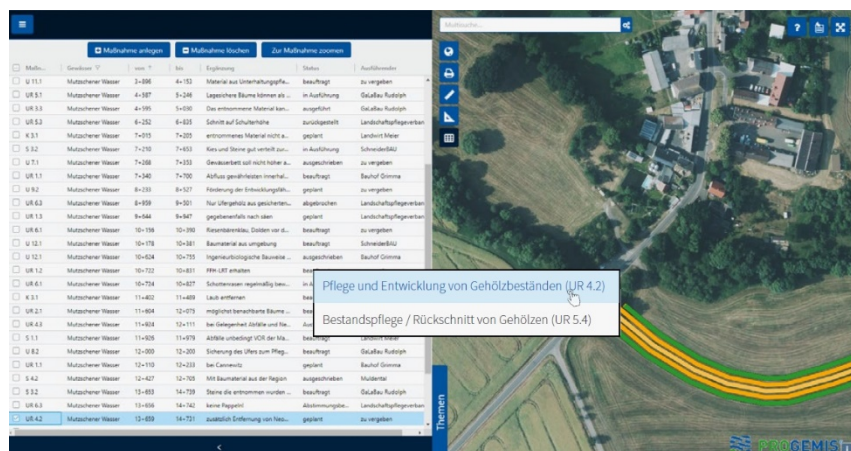


Abbildung 4: Planung und Dokumentation einer Maßnahme in Tabellen- und Kartenansicht

Als wesentliches Merkmal zu ihrem Planungs- bzw. Umsetzungsstand erhält jede Maßnahme einen entsprechenden Status. Anhand der Einstufung bzw. Anpassung des Maßnahmenstatus können die beteiligten Akteure schnell und unkompliziert über die Maßnahmen kommunizieren bzw. Informationen dazu austauschen. Beispiele für zu vergebende Formen des Maßnahmenstatus sind „geplant“, „beauftragt“, „ausgeführt“, „pausiert – Abstimmung erforderlich“, „abgenommen“ u. ä..

Durch eine Logbuchfunktion dokumentiert das System, wer zu welchem Zeitpunkt eine Maßnahme angelegt oder deren Status geändert hat. Damit kann beispielsweise die Ausführung von Verkehrssicherungsmaßnahmen eindeutig und unveränderbar mit Datum und Uhrzeit nachgewiesen werden.

5 Dank

Die Grundversion der Software-Lösung PROGEMIS® ist ein Produkt des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts „Innovative Systemlösungen für ein transdisziplinäres und regionales ökologisches Hochwasserrisikomanagement und naturnahe Gewässerentwicklung (In_StröHmunG)“ (vgl. DWA, 2018). Der Verbund ist eines von 15 Projekten in der Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“. ReWaM ist Teil des BMBF-Förderschwerpunktes „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM) im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA3).

6 Literatur

DWA (Hrsg. 2018): In-StröHmunG – Innovative Systemlösungen für ein transdisziplinäres und regionales ökologisches Hochwasserrisikomanagement und naturnahe Gewässerentwicklung. Abschlussbericht des BMBF-ReWaM-Projektes In_StröHmunG, Hennef, 2018

Autor:

Dr.-Ing. Andreas Stowasser

Stowasserplan GmbH&Co.KG
Hauptstr. 47f
01445 Radebeul

Tel.: +49 351 32300460
Fax: +49 351 32300469
E-Mail: stowasser@stowasserplan.de

Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischauf- und -abstieg durch ein Wasserwirbelkraftwerk

Falko Wagner

Peter Warth

Nadine Müller

Christian Jähnel

Jürgen Stamm

B3 Saal 1

Wasserwirbelkraftwerke (WWK) sind Kleinwasserkraftwerke zur Nutzung des Wasserkraftpotenzials an Standorten mit geringen Fallhöhen und Abflüssen. Sie werden als "fischfreundliche" Anlagen vermarktet, die es den Fischen ermöglichen, stromauf und stromab zu wandern. Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsprojekts wurde ein 1:1-Labormodell eines WWK errichtet, um die ökologische Durchgängigkeit für Fische zu untersuchen. Die Kombination von RFID-Telemetrie und Videoaufzeichnung im Rahmen der ethohydraulischen Untersuchungen ermöglichte eine quantitative Analyse des Verhaltens. Passagebedingte letale Schäden oder mittel- bis langfristige gesundheitliche Beeinträchtigungen der Fische traten nicht auf. Kollisionen mit den Turbinenschaufeln sind aufgrund der geringen Turbinendrehzahl und Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu erwarten und wurden nicht beobachtet. Richtung stromab ist die Anlage für Fische passierbar, wenngleich eine Verzögerung des Abstiegs beobachtet wurde. Zahlreichen adulten Bachforellen gelang die Passage stromauf ins Oberwasser. Für alle anderen Arten war das WWK allenfalls sehr eingeschränkt passierbar.

Stichworte: Wasserwirbelkraftwerk, ethohydraulische Versuche, Fische, 3D-HN, Passierbarkeit, Fischschädigung

Einleitung

Das Wasserwirbelkraftwerk (WWK), eine erstmals im Jahr 1968 patentierte Wasserkraftanlage, verfügt über ein rotierendes Strömungsregime (Rankine-Wirbel) mit einer im Wirbelkern positionierten, vertikalachsigen, langsam drehenden Turbine vom Typ Francis. Felderkundungen an Anlagen in der Schweiz (Kirchhofer et al. 2019) und an einer Pilotanlage in Deutschland (Zinn 2014) lassen erwarten, dass WWK für einige Fischarten in beide Richtungen passierbar sind. Im Rahmen eines BMBF geförderten Forschungsprojektes war zu klären, inwieweit ein für die ökologische Durchgängigkeit von Fischen optimierter Anlagentyp die Durchwanderbarkeit ermöglicht, welche Schädigungsrate bei der Passage zu erwarten ist und ob bzw. wie stark die Fische diese Anlage meiden. Hierzu wurden ethohydraulische Experimente durchgeführt, die belastbare Aussagen auf Basis quantitativer Daten ermöglichen. Auch dem hinsichtlich Fischpassierbarkeit optimierten WWK fehlt ein entscheidendes Merkmal von Fischaufstiegsanlagen, ein durchgängiger Wanderkorridor mit naturähnlicher Gewässersohle und Kieslückensystem (DWA 2014). Sohlorientierten Kleinfischen und Wirbellosen ist eine uneingeschränkte Passage stromauf daher nicht möglich. Der Schwerpunkt wird im Folgenden darum auf die stromabwärts gerichtete Passierbarkeit gelegt.

1.1 Pilotmodell

Das physikalische Modell des WWK im Hubert-Engels-Labor des IWD wurde im Maßstab 1:1 errichtet, wobei die bautechnische Realisierung insbesondere durch die Anforderungen der Fische bestimmt wurde (Müller & Stamm 2018). Das Labormodell dient zur hydrotechnischen Untersuchung des Strömungssystems, zum Test der maschinenbau- und energietechnischen Konfiguration, zur Optimierung der ethohydraulischen Strömungsverhältnisse und zur Durchführung ethohydraulischer Untersuchungen.

Es besteht aus Quelltopf, Ober- und Unterwasserkanal sowie einem leicht spiralförmigen 1,5 m hohen Wirbelbecken (größter Radius am Einlauf des Beckens 1,98 m, kleinster Radius innen 1,68 m). Abbildung 1 zeigt die zentral im Wirbelbecken angeordnete vertikalachsige Turbine, die vom zentralen Wasserwirbel angetrieben wird. Die Bodenöffnung unter der Turbine hat einen Durchmesser von 0,8 m. Die Turbine ist mit einem Abstand von 1 cm über dem Boden des Wirbelbeckens an der Gerätebrücke montiert, auf der der Generator befestigt ist.

Die maximale Abflussleistung des insgesamt 24 m langen Modells beträgt bis zu 700 l/s. Der Unterwasserstand kann durch Dammbalken reguliert werden. Die Drehzahl der Turbine wird leistungsabhängig am Wechselrichter gesteuert und liegt im Bereich von 18 min^{-1} bis maximal 30 min^{-1} , während der ethohydraulischen Fischversuche im Mittel bei 24 min^{-1} . Die Turbine mit neun Laufradschaufeln sowie die Geometrie des Beckens blieben für die hier vorgestellten Untersuchungen unverändert. Zwischen den neun Laufradschaufeln befinden sich jeweils $0,27 \text{ m} \times 0,27 \text{ m}$ große Öffnungen, durch die die auf- und abwärts gerichtete Fischmigration möglich sein soll.

Die Messung der dreidimensionalen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte mit einer ADV-Sonde der Firma Nortek. Die Wassertiefen wurden mittels Ultraschallsensoren aufgezeichnet und die Leistung sowie die Drehzahl am Wechselrichter ermittelt. Zur Untersuchung der Strömungsparameter in Bereichen des Labormodells, die für die Messtechnik nicht zugänglich sind und um raumkontinuierliche instationäre Strömungsinformationen zur ethohydraulischen Interpretation zu erhalten, wurden für das Pilotmodell dreidimensionale hydronumerische (3D-HN) Simulationen in OpenFOAM (Version 5.0) durchgeführt (Abbildung 3). Die rotierende Turbine wurde durch ein dynamisches Netz simuliert, das durch ein „Arbitrary Mesh Interface“ mit dem statischen Netz verbunden ist. Die Kalibrierung dieses Modells erfolgte durch den Abgleich von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten mit dem Pilotmodell.

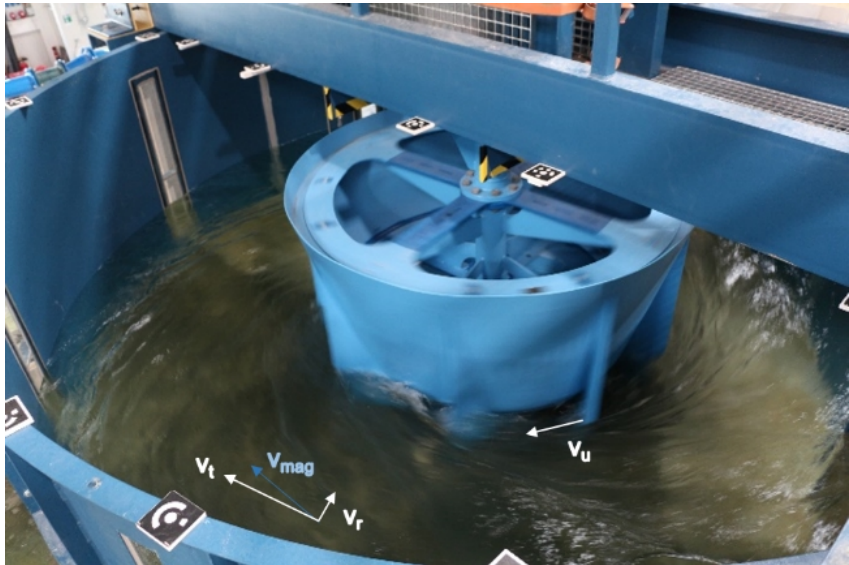


Abbildung 1: Wasserwirbelkraftwerk bei einem Turbinendurchfluss von 350 l/s

1.2 Ethohydraulische Versuche

Dem angedachten Einsatzgebiet des modifizierten WWK entsprechend, standen bei der Untersuchung des Fischeinf- und -abstiegs die Arten der Bachforellen- und Äschenregion im Mittelpunkt. Um mit einer geringen Anzahl von Tierversuchen Aussagen zu allen relevanten Arten zu treffen, erfolgte eine Kategorisierung entsprechend ihrer potenziellen Schwimmleistung, des Schwimmhorizontes, der Körpergröße der Adulttiere sowie der Schädigungsempfindlichkeit bei Turbinenpassage und die Auswahl nur eines Vertreters pro relevanter Gildenkombination. Zusätzlich hinzu kam der Aal, da er nach der Verordnung (EG) Nr. 1100/2007 einen besonderen Schutzstatus besitzt und als katadromer Wanderfisch von Wasserkraftwerken besonders betroffen ist. Für die Untersuchung des Fischabstiegs resultierten 4 (Aal, Bachforelle, Gründling, Plötze) und für die des Fischeinfstiegs 5 Arten (Bachforelle, Elritze, Gründling, Plötze, Schmerle). Die Versuchsfische wurden in der jeweiligen Hauptwanderzeit der Arten in Gewässern nahe des Versuchsortes gefangen und nach Versuchsende dort wieder freigelassen. Bachforellen mussten bei

den Schädigungsuntersuchungen teilweise durch Bachsaiblinge aus Aquakultur ersetzt werden, da die schlechte Bestandssituation keine Entnahme aus diesen Gewässern erlaubte. Allen Versuchstieren wurden intraabdominal HDX-Tags implantiert, um die Tiere in der Versuchsanlage mittels Antennen zu lokalisieren sowie eine individuelle Auswertung der Schädigung zu ermöglichen. Das Verhalten der Tiere im WWK wurde mittels RFID-Telemetrie (HDX) sowie durch Videotechnik erfasst (Abbildung 2). Eine Beeinflussung der Fische durch den Beobachter war so ausgeschlossen. Das Verhalten wurde über die Livebilder direkt protokolliert und anschließend anhand der Video- und Telemetriedaten verifiziert und ergänzt. Beleuchtung, Temperatur, Wasserparameter, Durchfluss und Turbinendrehzahl wurden überwacht. Die Versuche erfolgten im Hellen unter weitgehend konstanten Lichtverhältnissen. Durch aktive Kühlung konnten die Änderung der Wassertemperaturen und die resultierende Schwimmleistung im Versuchszeitraum auf $< 2\text{ K}$ begrenzt werden. Die Beschaffung, Haltung und Behandlung der Fische erfolgte so schonend wie möglich, um den Stress für die Tiere zu minimieren und optimale Voraussetzungen für ein natürliches Abstiegsverhalten zu schaffen. Das gesamte Vorhaben wurde als Tierversuch beantragt und unter der Registrierungsnummer TVV 71/2017 von der zuständigen Behörde genehmigt.

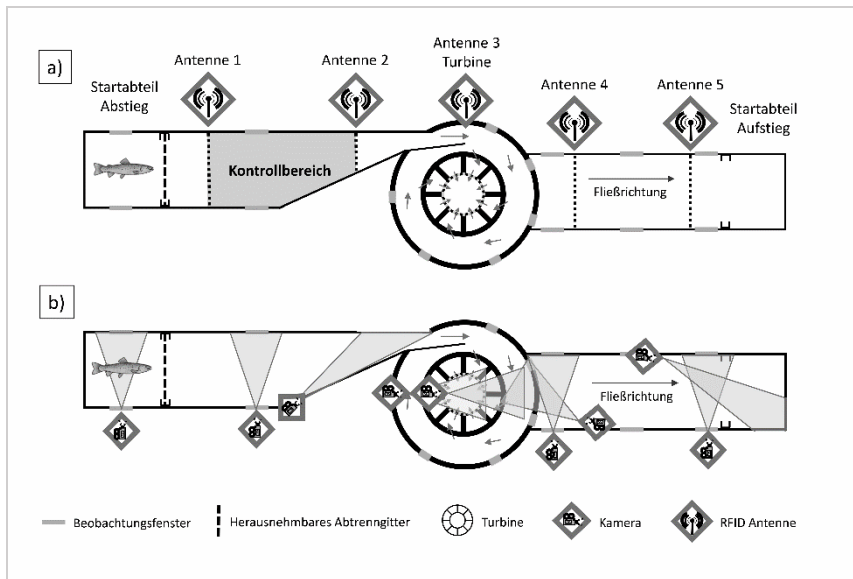


Abbildung 2: Versuchsrinne mit RFID-Antennen und Videosystem für die ethohydraulischen Versuche

Zur Quantifizierung der Schädigungen bei der Turbinenpassage wurde der Gesundheitszustand der Fische vor und nach dem Versuch fotografisch dokumentiert und basierend auf dem Verletzungsprotokoll nach Müller et al. (2017) erfasst. Die passagebedingte Schädigung (D) wurde unter Berücksichtigung der Schädigung in den zusätzlichen Kontrollgruppen ermittelt. Die Berechnung erfolgte auf Basis der Gesamtschädigungsrate (TD) der Passagegruppe sowie der Handlingschädigungsrate (HD) der Kontrollgruppe wie folgt:

$$D = 1 - \frac{(1 - TD)}{(1 - HD)}$$

Die erfassten Verletzungstypen beinhalten noch keine Bewertung der resultierenden Beeinträchtigung des Fisches. Die protokollierten Verletzungen wurden daher entsprechend ihres Beeinträchtigungspotenzials 5 Kategorien zugeordnet (Tabelle 1).

Verletzungskategorien und resultierendes Beeinträchtigungspotenzial für die Fische

Kategorie	Beeinträchtigungspotenzial
1	unverletzt, keine Beeinträchtigung
2	leichte Verletzung, allenfalls kurzfristige Beeinträchtigung
3	mittelschwere Verletzung, vorübergehende Beeinträchtigung
4	schwere Verletzung, nachhaltige Beeinträchtigung, Mortalitätsrisiko stark erhöht
5	unmittelbar tödliche Verletzung

Nur Fische der Passagegruppe, die beim Abstieg vor Ablauf der halben Versuchsdauer die Kontrollstrecke zwischen Antenne 1 und 2 erfolgreich pasierten, galten als motiviert und flossen in die weitere Datenauswertung ein. Als Meidungsverhalten der Fische des WWK wurde ein Wechsel der bis Antenne 2 abgestiegenen Fische wieder stromauf bis Antenne 1 gewertet. Über die individuelle Schwimmdauer von Antenne 1 zur Antenne 2 im Oberwasser als Referenzzeit wurde geprüft, ob es im Bereich der Turbine zwischen Antenne 2 zu 4 zur Verzögerung des Abstiegs kommt. Im Fall der Fischeaufstiegsversuche wurden die Fische erst nach vollständiger Passage des Kontrollbereiches zwischen Antenne 5 und Antenne 4, als motiviert für den Aufstieg gewertet und in die weitere Analyse einbezogen.

2 Ergebnisse

2.1 Fischeaufstieg

Insbesondere die Elritzen ($N_{\text{gesamt}} = 70$) zeigten mit einem Anteil von 100 % und die Bachforellen ($N_{\text{gesamt}} = 159$) mit 95 % eine besonders hohe Aufstiegs-motivation. Bei Schmerle ($N_{\text{gesamt}} = 137$), Gründling ($N_{\text{gesamt}} = 120$) und Plötze ($N_{\text{gesamt}} = 120$) lag der Anteil zwischen 57 bis 95 % und war bei den Versuchen mit verringertem Durchfluss stets höher als bei 700 l/s. Während der Versuche mit maximalem Durchfluss von 700 l/s stiegen 54 % der motivierten Bachforellen durch das Turbinenbecken hindurch bis zu Antenne 2 ins Oberwasser auf. Individuen aller anderen Arten gelang dies nicht. Bei reduziertem Durchfluss pasierten allerdings auch 4 Plötzen (7 %) und eine Elritze (2,5 %)

die Turbine, wobei aber nur 2 der Plötzen und keine Elritze bis zu Antenne 2 ins Oberwasser vordrangen. Schmerlen und Gründlinge passierten auch bei verringertem Durchfluss die Turbine nicht. Aus den Ergebnissen der Modellierung der Strömungsverhältnisse in und unter der Wirbelkammer (Abbildung 3) lässt sich ableiten, warum insbesondere die sohlorientierten Kleinfischarten nicht in das Wirbelbecken gelangten. Vor allem sohlnah überstieg die Fließgeschwindigkeit die Sprintgeschwindigkeit dieser Fische von rund 0,9 m/s (nach Ebel 2013) bei den Wassertemperaturen im Versuch in einer langgestreckten Zone deutlich. Hinzu kommt, dass die Sohle glatt ist und die Fische aufgrund der Stufe direkt unter dem Becken ihren Schwimmhorizont verlassen müssen.

Hinzu kommt, dass die Strömung im Unterwasserkanal nach dem Turbinenauslass hochturbulent und wirbelbehaftet ist. Die Ausprägung der Wirbel hängt neben Durchfluss und Unterwasserstand insbesondere von der Turbinendrehzahl ab. Während beispielsweise Elritzen bei Versuchen mit 700 U/min bereits zwischen Antenne 4 und 5 durch Wirbel stromab versetzt wurden, gelangten einige bei einem Durchfluss von 350 l/s bis Antenne 3 unter der Turbine.

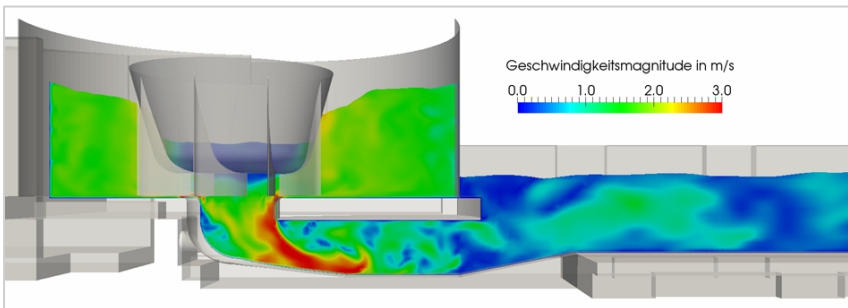


Abbildung 3: Schnitt des 3D-HN-Modells der Wirbelkammer und dem anschließenden Ausströmbereich des Wasserwirbelkraftwerkes (OpenFOAM) © IWD, TU Dresden bei einem Durchfluss von 700 l/s

2.2 Fischabstieg

Die Motivation der Fische bei den Versuchen zur abwärts gerichteten Passage variierte ebenfalls zwischen den Arten. Beim Aal betrug ihr Anteil 50 % aller in den Versuch eingebrachten Tiere, bei der Bachforelle 69 % und beim Bachsaibling 74 %. Aus technischen Gründen waren mit den Daten von Plötze und Gründling keine belastbaren quantitativen Analysen möglich. Bei Aal und Bachforelle stieg ein Anteil von 86 % der motivierten Tiere durch das Turbinenbecken in das Unterwasser ab. Beim Bachsaibling war der Anteil mit 67 % geringer. Rund 25 % der Aale verließen zunächst den Turbineneinlauf aktiv wieder stromauf bis in das Oberwasser zu Antenne 1, was als Meidungsreaktion interpretiert wird. Mit einem Anteil von 24 % der Tiere reagierte der Bachsaibling ähnlich. Bei der Bachforelle war mit einem Anteil von 35 % die Meidungsreaktion etwas stärker ausgeprägt. Bei allen Arten gab es Tiere, deren Abstiegsgeschwindigkeit im unmittelbaren Bereich des WWK zwischen Antenne 2 und 4 als verlangsamt eingestuft wurde, wobei der stärkste Effekt beim Bachsaibling auftrat. (Abbildung 4)

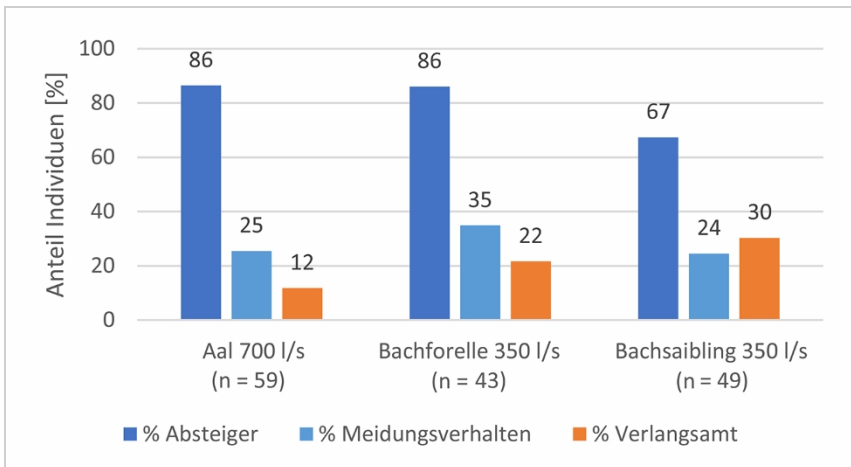


Abbildung 4: Prozentualer Anteil der als motiviert eingestuft Tiere der Arten Aal, Bachforelle und Bachsaibling, welche erfolgreich in das Unterwasser abgestiegen, ein Meidungsverhalten zeigten oder bei denen eine Verlangsamung der Abstiegsgeschwindigkeit gegenüber dem Kontrollbereich festgestellt wurde

Außer beim Aal erfolgte der Abstieg im Beobachtungsbereich fast ausschließlich mit dem Kopf entgegen der Strömungsrichtung. Es wurden Fische beobachtet, die mehr als eine Turbinenumdrehung zwischen den Rotorscheufeln verharren. Der absteigende Fisch bewegt sich mit der Strömung im Wirbelbecken und schwimmt durch die Turbinenschaufeln bzw. hält sich dazwischen auf (Wagner et al. 2019). Die Passage von Fischen durch das Wirbelbecken wird abschnittsweise betrachtet: a) für den oberstromigen Zulauf bis zur Turbine (im Wirbelbecken) sowie b) für die Passagestrecke zwischen den Turbinenschaufeln. Im erstgenannten Abschnitt sind die Geschwindigkeitsmagnituden v_{mag} von Relevanz sowie die Relativgeschwindigkeit der Strömung \vec{v}_{rel} zur Umlaufgeschwindigkeit der Turbine \vec{v}_u . Im Abschnitt zwischen den Turbinenschaufeln werden die Winkelgeschwindigkeit sowie die Anteile von Tangential- zu Radialgeschwindigkeit (\vec{v}_t und \vec{v}_r , Abbildung 1) zur Beurteilung der Kollisionsgefahr herangezogen.

Im Wirbelbecken entspricht die örtliche Tangentialgeschwindigkeit größtenteils der Geschwindigkeitsmagnitude. Die Tangentialgeschwindigkeit wird zur Turbine hin größer und ist über die Fließtiefe weitestgehend konstant (Abbildung 5). Die Radialgeschwindigkeiten sind am Beckenrand nahezu null, werden ebenso zur Mitte hin größer, betragen aber nur ca. 10 % der Tangentialgeschwindigkeiten. Die maximale Geschwindigkeit von etwas über 2 m/s ist unter Anwendung gildenspezifischer Modelle zur überschlägigen Ermittlung der Sprintgeschwindigkeit nach (Ebel 2013) von adulten Individuen vieler rheophiler Arten im natürlichen Temperaturbereich während der Hauptmigrationsphasen beherrschbar. Für schwimmschwächere Arten wurde im Versuch beobachtet, dass sie aufgrund der gleichmäßigen Zunahme der Geschwindigkeit im Wirbelbecken schnelle Bereiche meiden können und daher nicht ungewollt absteigen.

Die Betrachtung der Geschwindigkeitsverteilung erlaubt eine erste Einschätzung der Verhältnisse in der Anlage nach DWA M-509 (DWA 2014). Für die Beurteilung der Fischpassage ist jedoch auch die Turbulenz von Bedeutung, da Wirbel und lokale Spitzen die Orientierung der Fische erschweren können. Bei einer Drehzahl von $n = 22,3 \text{ min}^{-1}$ beträgt die Umlaufgeschwindigkeit an der äußeren Turbinenschaufel $|\vec{v}_u| \mathbf{1,98} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ mit $|\vec{v}_u| \mathbf{1,2} \mathbf{2} \mathbf{2} \mathbf{r}_{\text{turbine}} \mathbf{2} \eta$. Angenommen, der absteigende Fisch bewegt sich im Wirbelbecken mit der resultierenden Fließgeschwindigkeit \vec{v}_{mag} bzw. \vec{v}_t (da $\vec{v}_{\text{mag}} \mathbf{''} \vec{v}_t$ außerhalb der Turbine), dann „erlebt“ er die Umlaufgeschwindigkeit als Relativgeschwindigkeit $\vec{v}_{\text{rel}} \mathbf{1} \vec{v}_t \mathbf{!} \vec{v}_u$ (Abbildung 5). In direkter Nähe zur Turbine überschreitet die

Fließgeschwindigkeit die Turbinenumlaufgeschwindigkeit. Im Nahfeld der Turbine gibt es einen Bereich, in dem $\frac{v}{v_{rel}} \approx 1$ gilt. Dort sind Wasser und Turbine gleich schnell. Je weiter sich der Fisch im Wirbelbecken von der Turbine entfernt, desto langsamer schwimmt er im Vergleich zur Turbinenumlaufgeschwindigkeit. In diesem Bereich liegen die Geschwindigkeiten in der Größenordnung, die auch schwimmschwächere Arten beherrschen können, so dass sie grundsätzlich in der Lage sind, den Abstieg zu meiden.

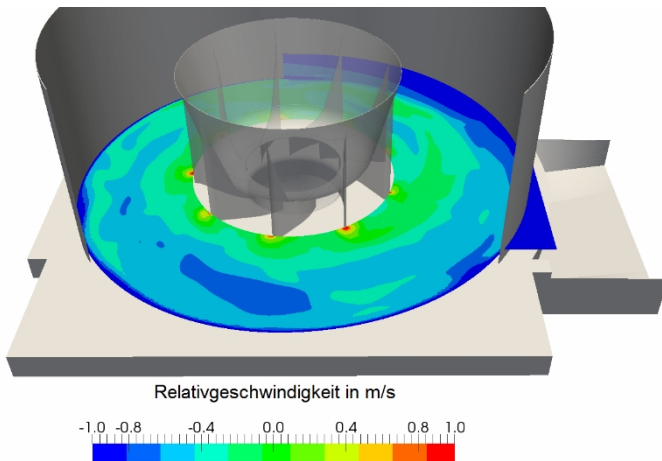


Abbildung 5: Fließgeschwindigkeit relativ zur Umlaufgeschwindigkeit der Turbinenschaufelspitze $\frac{v}{v_{rel}} \approx \frac{v}{v_t} \approx \frac{v}{v_u}$ aus hydronumerischem 3D-Modell

In Abbildung 5 sind lokale Ablösungen an den Turbinenschaufelspitzen zu sehen, welche auch im Labormodell anhand von turbulenten Wirbeln zu Tage traten. Abbildung 6 zeigt die Radialgeschwindigkeit zwischen den Turbinenschaufeln. Im Strömungsschatten der Turbinenschaufeln ist die Radialgeschwindigkeit nach innen gerichtet, während sie auf der gegenüberliegenden Seite ins Wirbelbecken gerichtet ist. Hält sich ein Fisch zwischen den Turbinenschaufeln auf, erfährt dieser vor allem den Radialgeschwindigkeitsanteil, welcher weniger als 1 m/s beträgt. Auch hier können adulte Individuen vieler rheophiler Arten bei Bedarf ausweichen.

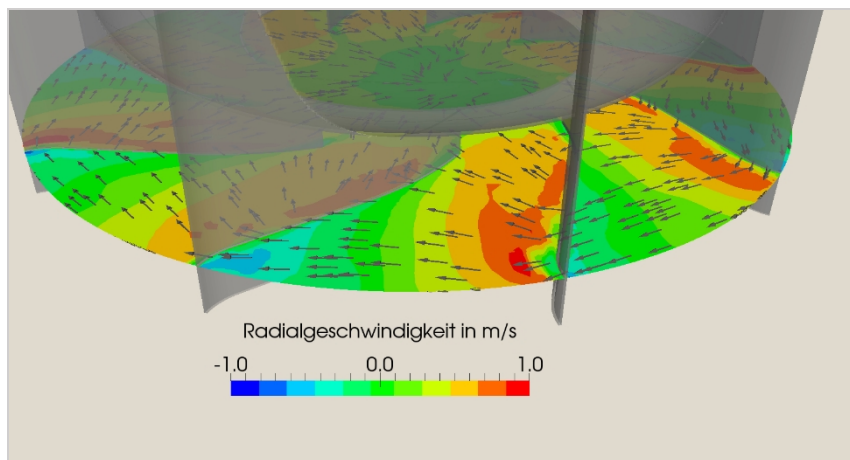


Abbildung 6: Radialgeschwindigkeit zwischen den Turbinenschaufeln (positiv in Richtung der Turbinendrehachse), Vektorpfeile zeigen die Richtung der Geschwindigkeitsmagnitude an

2.3 Fischeschädigung und Mortalität

Während der Versuche trat in Verbindung mit der Passage des WWK weder direkte, noch verzögerte (Bezugszeit: 48 h) passagebedingte Mortalität auf. Entsprechend waren auch keinerlei schwere, potenziell tödliche Verletzungen der Kategorien 4 und 5 zu verzeichnen. Leichte Verletzungen der Kategorien 2 und 3 mit geringem bis mittlerem Beeinträchtigungspotential für die Fische kamen jedoch sowohl in den Kontroll- als auch in den Passagegruppen vor (Tabelle 2). Insbesondere bei den Arten Aal und Gründling waren die Schädigungsraten passageunabhängig hoch. Nur bei der Bachforelle ergibt sich rechnerisch, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Kontrollgruppe, eine passagebedingte Verletzungsrate von 14 %. Bei keiner der Arten lässt sich jedoch basierend auf den Ergebnissen des Fisher Exact Tests (**U** 0,05; **V** - 0,95) ein Effekt der Passage auf das Verletzungsrisiko statistisch absichern.

Tabelle 1: Schädigungsrate (SR, Kategorie 2 & 3) der Kontrolltiere, die Gesamtschädigungsrate der Tiere nach dem Passageversuch (Effekt Handling und Passage), das Ergebnis des Test auf Unterschiede zwischen Kontroll- und Passagegruppe (Fisher exact test single sided), sowie die resultierende Schädigung der einzelnen Arten durch die Turbinenpassage während Abstieg

	Aal		Bachforelle*		Gründling	
SR Kontrollgruppe	95%	n = 63	51%	n = 35	83%	n = 93
SR Passagegruppe	94%	n = 50	58%	n = 31	80%	n = 54
P-Wert	0,999		0,627		0,662	
Passagebedingte Schädigung	0%		14%		0%	

**teilweise durch Bachsaiblinge ersetzt*

Während der Passage sind die Fische ähnlich wie bei der Archimedischen Schraube allenfalls geringen Druckwechseln ausgesetzt (Müller et al. 2019). Diese Schädigungsursachen von Turbinen entfallen. Eine Schädigung infolge des direkten Kontaktes mit den Turbinenblättern ist aufgrund der geringen Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 24 min⁻¹ und der geringen Unterschiede des Vektors und Betrags des Strömungspfades und des Schwimmpfades der Fische (siehe 2.2) weitgehend ausgeschlossen. Ein Verletzungsrisiko besteht allerdings, falls Fische in den Spalt zwischen Turbinenschaufel und Beckenboden gelangen. Letzteres wurde im Labormodell bei einem 1 cm großen Spalt nicht beobachtet, ist aber durch Verschleiß und ungleichmäßige Spaltmaße bei Anlagen im Freiland nicht auszuschließen. Bei Wasserkraftschnecken ist ein hohes Verletzungsrisiko hierdurch belegt (Schmalz 2011).

3 Zusammenfassung

Der Einsatz der RFID-Telemetrie bei den ethohydraulischen Untersuchungen zum Fischeauf- und -abstieg in Kombination mit Videoüberwachung ermöglicht auf Basis der individuellen Identifikation der Probanden eine präzise Schädigungsanalyse. Die Lokalisierung der Fische mit genauem Zeitpunkt per RFID-Transponder macht Geschwindigkeitsmessungen und die quantitative Erfassung von Verhaltensweisen und Aufenthaltszeiten an verschiedenen Orten sowie die statistische Auswertung der Ergebnisse möglich. Von den

fünf getesteten Arten stiegen drei erfolgreich durch die Turbine bis in das Wirbelbecken auf. Bei Plötze und Elritze gelang dies aber lediglich Einzeltieren und nur bei reduziertem Durchfluss. Die sohlorientierten Kleinfische, Schmerle und Gründling, waren nicht in der Lage gegen die Strömung in das WWK einzuschwimmen. Die Ursache hierfür sind mit hoher Wahrscheinlichkeit zu hohe sohlnahe Fließgeschwindigkeiten, fischskalige Wirbel und das Fehlen von rauem Sohlensubstrat und die zu überwindende Sohlenstufe unter dem Wirbelbecken.

Die Ergebnisse der Abstiegsversuche zeigen, dass über das WWK in der getesteten Konfiguration ein schadloser Fischabstieg möglich ist. Viele der motivierten Fische passierten die Anlage erfolgreich, allerdings nicht immer ohne Meidungsverhalten und Verzögerungen. Dies kann den Energiebedarf der Fische steigern, Stress bewirken und sich letztendlich auch negativ auf den Reproduktionserfolg auswirken (Schmalz et al. 2015), so dass ein negativer Effekt auf die Fische, insbesondere bei mehreren Anlagen in Serie, nicht auszuschließen ist.

4 Danksagung

Diese Veröffentlichung wurde aus Daten erstellt, die im Rahmen des Verbundprojektes „VP4: Kaskade Fischfreundliches Wehr“ (03WKCO4) erhoben wurden und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Es ist Teil des Wachstumskerns „Fluss-Strom Plus“. Die Autoren danken den Projektpartnern für die angenehme Zusammenarbeit.

5 Literatur

- Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., DWA (2014): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Merkblatt DWA-M 509, Hennef 2014
- Ebel, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen: Fish protection and downstream passage at hydro Power stations; Handbuch Rechen- und Bypasssysteme; Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Halle (Saale): Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, 2013
- Europäische Union (2007): Verordnung (EG) Nr. 1100/2007 des Rates vom 18. September 2007 mit Maßnahmen zur Wiederauffüllung des Bestands des Europäischen Aals, 2007

- Kirchhofer, A.; Breitenstein, M.; Flück, M.; Hoppler, L. (2017): Kraftwerke an der Suhre – Erfolgskontrolle der Fischdurchgängigkeit. Bericht im Auftrag der Sektion Jagd und Fischerei des Kantons Aargau, Bern 2017
- Müller, M.; Pander, J.; Geist, J. (2017): Evaluation of external fish injury caused by hydropower plants based on a novel field-based protocol. In: Fisheries Management and Ecology 24, 2017. S. 240-255
- Müller, N.; Jähnel, C.; Stamm, J.; Wagner, F. (2019): Analyse der Strömung in einem Wasserwirbelkraftwerk hinsichtlich des Fischabstiegs. In: WasserWirtschaft 9, 2019S. 60-63,
- Müller, N.; Stamm, J. (2018): Errichtung eines 1:1 Labormodells für ethohydraulische Untersuchungen an einem Wasserwirbelkraftwerk. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen: 41. Dresdner Wasserbaukolloquium, 2018. S. 123-132
- Schmalz, W.; Wagner, F.; Sonny, D. (2015): Arbeitshilfe zur standörtlichen Evaluierung des Fischschutzes und Fischabstiegs. Bericht im Auftrag des Ecologic Institutes gemeinnützige GmbH, Breitenbach 2015
- Schmalz, W. (2011): Fischabstieg durch eine Wasserkraftschnecke an einem Ausleitungskraftwerk. In: WasserWirtschaft 7-8, 2011. S. 82-87
- Wagner, F.; Warth, P.; Royan, M.; Lindig, A.; Müller, N.; Stamm, J. (2019): Laboruntersuchungen des Fischabstiegs über ein Wasserwirbelkraftwerk. In: WasserWirtschaft 9, 2019.S. 64-67
- Zinn, L. (2014): Biologische Funktionskontrolle des „Fischfreundlichen Wehrs“. Diplomarbeit, Hochschule Zittau/Görlitz 2014

Autoren:

Dr. Falko Wagner¹
Dr. Peter Warth¹

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm²
Dipl.-Ing. Nadine Müller²
Dipl.-Ing. Christian Jähnel²

¹ Institut für Gewässerökologie und
Fischereibiologie Jena
Sandweg 3
07745 Jena

² Institut für Wasserbau und Technische
Hydromechanik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Tel.: +49 3641 637745
Fax: +49 3641 219545
E-Mail: falko.wagner@igf-jena.de
peter.warth@igf-jena.de

Tel.: +49 351 01234 5
Fax: +49 351 01234 56
E-Mail: juergen.stamm@tu-dresden.de
nadine_mueller@tu-dresden.de
christian.jaehnel@tu-dresden.de

Untersuchungen zum ökologischen Abfluss in Gewässern des Himalayas mit moderner Feld- und Modellierungstechnik

Matthias Schneider
Iana Kopecki
Klaus Jorde
Christian Haas
Philipp Thumser

Fischhabitate, Habitatmodellierung, CASiMiR, Bhutan, Himalaya, Ökologischer Abfluss, SfM, Structure from Motion

1 Hintergrund

1.1 Wasserkraft und Ökologie in Bhutan

Das Königreich Bhutan ist im Himalaya an der Grenze zwischen Indien und China und unmittelbar östlich von Nepal gelegen. Bhutan hat ein großes Wasserkraftpotential, das auf 30.000 MW geschätzt wird, und hat in seinem nationalen Entwicklungsplan erklärt, die Produktion erneuerbarer Energie deutlich zu steigern, insbesondere durch die erweiterte Wasserkraftnutzung. Diese Steigerung der Energieerzeugung aus Wasserkraft, die momentan schon ca. 40% der wirtschaftlichen Leistung des Landes ausmacht, wird als Haupttriebfeder für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes in Zukunft angesehen.

Auf der anderen Seite hat das Königreich statt dem Bruttosozialprodukt (Gross National Product) das Bruttonationalglück (Gross National Happiness = GNH) als Entwicklungsziel genannt. Der Schutz der Umwelt spielt dabei eine herausragende Rolle und stellt eine von insgesamt vier Säulen dar, auf welchen die GNH beruht.

Bhutan hat momentan noch weitgehend unbeeinflusste Gewässersysteme. Um diese Gewässersysteme zu schützen, sind ökologisch begründete Abflüsse (Ecological Flows = E-Flows) und die Fischwanderung von großer Bedeutung.

1.2 E-Flow Projekt und Untersuchungsstrecken

Während die ökologischen Standards im Land generell hoch sind, hat die Praxis hinsichtlich der Festlegung von E-Flows in der Vergangenheit nicht den hohen Ansprüchen an den Schutz der natürlichen Ökosysteme entsprochen. Das lag zum großen Teil am Fehlen klarer Richtlinien zur Festlegung von Abflussregelungen. Dies war der Anlass für die National Environmental Commission NEC ein Projekt zur Entwicklung einer nationalen Richtlinie für die Festlegung von ökologisch begründeten Abflussregelungen zu initiieren. Im Rahmen eines von der Österreichischen Entwicklungsbank (ADA) lancierten Projekts wurde von einem Team internationaler Experten eine Methode für die Entwicklung von E-Flows in Bhutan entwickelt. Ein wesentlicher Bestandteil des Projekts und der daraus entstandenen Richtlinie waren Untersuchungen an insgesamt vier Untersuchungsstrecken in den Flüssen Parochhu, Phochhu, Punatsangchhu und Wangchhu. Für all diese Strecken wurden Strömungs- und Habitatmodelle erstellt. (Abbildung 1)

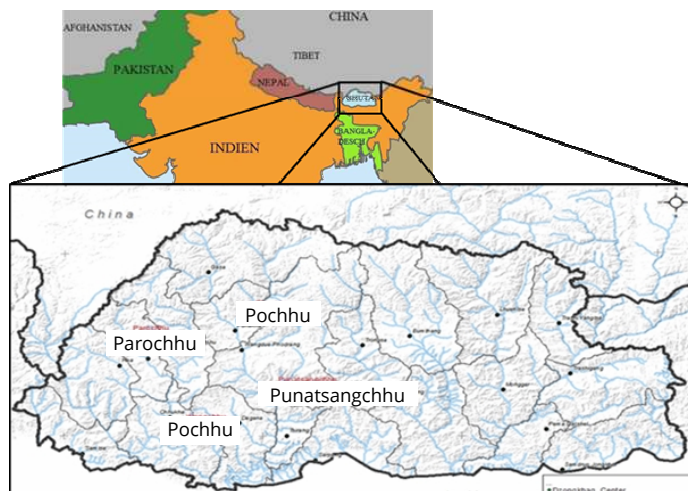


Abbildung 1: Lage von Bhutan im Himalaya und Positionen der vier untersuchten Strecken in den Gewässern Parochhu, Wangchhu, Phochhu und Punatsangchhu

2 Habitatmodelle und Anforderungen

2.1 Prinzip Habitatmodellierung

Habitatmodelle für aquatische Ökosysteme haben sich seit den 1990er Jahren auch in Europa etabliert, nachdem sie bereits in den 1970er Jahren in den USA entwickelt und insbesondere für Abflussregelungen bei Wasserentnahmen aus Fließgewässern angewendet wurden (IFIM Literaturhinweis). Wenngleich den entwickelten Modellen verschiedene Ansätze zu Grunde liegen, ist allen gemeinsam, dass sie hydraulische und morphologische Eigenschaften von Gewässern mit den Ansprüchen von Gewässerorganismen, meistens Fischen, verschneiden, um daraus Habitateignungen zu berechnen. Man spricht deshalb oft auch spezifisch von Habitateignungsmodellen.

Das in der hier vorgestellten Studie eingesetzte Modell CASiMiR wurde an der Universität Stuttgart entwickelt und wird seit Mitte der 1990er Jahre in angewandten und wissenschaftlichen Projekten eingesetzt und erweitert (Noack et al. 2013). Aktuelle Entwicklungen zielen auf die Bewertung der Auswirkungen von schnellen Abflussänderungen (z.B. Schwall/Sunk unterhalb von Spitzenstromkraftwerken, Sunk durch Bewässerungspumpen) und die Untersuchung der Leitströmung an Fischaufstiegsanlagen ab (s.a. www.fithydro.eu, Schneider et al. 2016).

Das Modell hat die Besonderheit, dass die Berechnung von Habitateignungen auf einem Fuzzy-Regel-Ansatz gründet und damit Informationen zu Habitatansprüchen verarbeiten kann, die eine Kombination aus Felddaten und Expertenwissen darstellen.

Dieser Ansatz bringt mehrere Vorteile mit sich, da

- a) neben der Integration von Expertenwissen durch die Verwendung von unscharfen Fuzzymengen wie „mittlere“ Wassertiefe, oder „hohe“ Fließgeschwindigkeit eine Unschärfe zulässt, die Studien in Gewässern ermöglicht, zu denen wenig Fischdaten vorliegen bzw. in denen aufgrund geringer Fischdichten kaum Daten erhoben werden können,
- b) er multivariat ist, was im Vergleich zum klassischen Ansatz mit univariaten Präferenzfunktionen eine realitätsnähere Beschreibung von Habitatansprüchen zulässt,
- c) die Anspruchsdaten gut übertragbar sind, da die generellen Ansprüche von Fischarten in unterschiedlichen Gewässern oft ähnlich sind, aber die bevorzugten Bereiche (z. Bsp. „mittlere“ Fließgeschwindigkeiten) nach oben oder unten verschoben sind.

2.2 Anforderungen an das HN-Modell bei Habitatuntersuchungen

Neben der Unsicherheit der Anspruchsdaten wirkt sich die Unsicherheit in den Ergebnissen der hydraulischen Modellierung zusätzlich auf die Genauigkeit der Habitatmodellierung aus. Fischhabitate werden zudem in der sogenannten Mikroskala im Dezimetermaßstab betrachtet und oftmals werden Niedrigwassersituationen modelliert. Im Unterschied zur Modellierung von Hochwässern spielen also Einzelstrukturen eine große Rolle, und lokale Strömungsmuster sind von Bedeutung. Aus diesen Gründen kommt einer möglichst genauen Abbildung des Gewässers im Hydraulik- und daran gekoppelten Habitatmodell in der Regel eine höhere Bedeutung zu als bei Hydraulikberechnungen für andere Zwecke. Die hohe räumliche Auflösung und ihr Einfluss auf die Abbildung komplexer Strömungsverhältnisse in heterogenen Gewässern wird an den Ergebnissen für die Flussstrecke im Wangchhu deutlich (Abbildung 2).

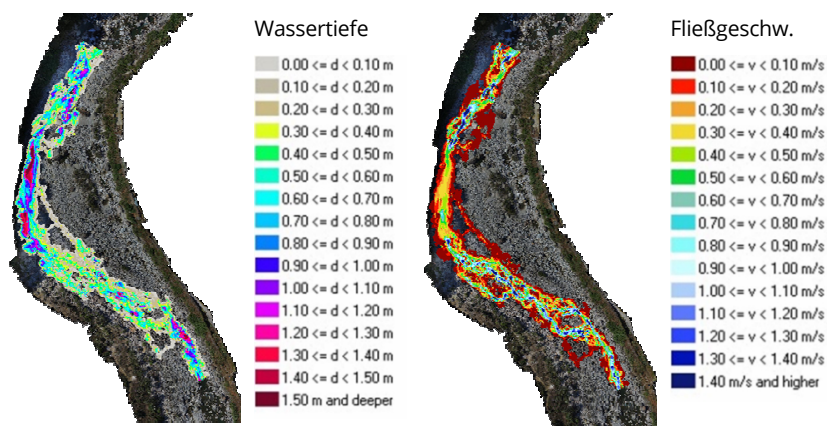


Abbildung 2: Ergebnisse der 2D-HN-Modellierung für den Fluss Wangchhu auf Basis eines hochaufgelösten DGMS, das unter Verwendung verschiedener Datensätze (terrestrische Vermessung, Echolot, Drohnenbefliegung erstellt wurde).

3 Vermessung heterogenem, schwer zugänglichem Gelände

3.1 Begehbare Gelände

Die gebräuchlichste Art zur Erstellung von Geländemodellen für lineare Strukturen wie Fließgewässer stellt die Vermessung von Querprofilen dar. Je

heterogener ein Gewässerabschnitt ist, desto geringer sind die Abstände zwischen den Querprofilen zu wählen, damit eine ausreichend genaue Abbildung der Gewässertopographie möglich ist. Bei watbaren Gewässern ist die Vermessung mit Tachymeter in der Regel schneller und genauer als mit Echolot, da für verlässliche Echolot Messung Mindestwassertiefen von 30 bis 50 cm notwendig sind.

Auch für die Modellierung der vier Untersuchungsstrecken in Bhutan wurden in den watbaren Zonen Querprofile vermessen. Diese sind zum einen notwendig in Bereichen, die durch die SfM Technik nicht erfassbar sind (Abschattung durch z.B. Vegetation, Wassertiefen zu groß), zum anderen dienen sie zur Ergänzung der SfM Daten in Bereich mit geringer Datendichte und zu deren Validierung.

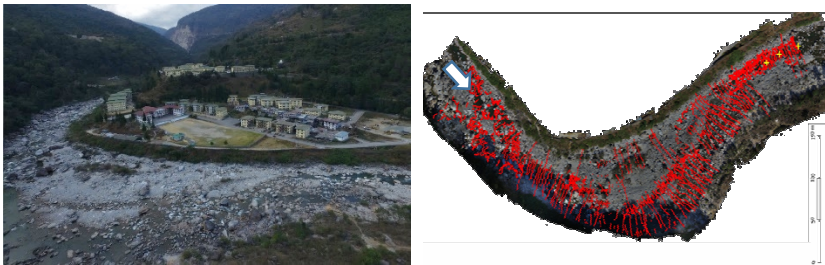


Abbildung 3: Untersuchungsstrecke am Fluss Wangchhu in Bhutan (li.), Darstellung der vermessenen Querprofile über einem aus Drohnenbildern erzeugten Orthofoto

3.2 Nicht watbare Zonen

In nicht watbaren Zonen wird die Vermessung der Flusstopographie normalerweise vom Boot mit Echolot durchgeführt. In zwei der untersuchten Gewässer waren die Verhältnisse in Teilbereichen jedoch so schwierig, dass eine Befahrung mit einem konventionellen Boot nicht möglich war. Deshalb wurde im Fluss Punatsangchhu ein Kajak eingesetzt, das mit Echolot und GNSS ausgestattet wurde. Dieses ermöglichte, auch in Weißwasserzonen und zwischen den in der Strecke gelagerten Felsblöcken, Sohldaten aufzunehmen (Abbildung 4). Mit demselben Kajak wurden auch im Fluss Phochhu Teile der Untersuchungsstrecke aufgenommen. Hier war die Fließgeschwindigkeit so hoch, dass eine Befahrung quer zur Strömung nicht möglich war. Das Kajak kreuzte das Gewässer in mehreren Durchgängen und mehrere Male von links nach rechts und zurück. Die dadurch entstehenden „Vermessungspfade“ sind in Abbildung 4 im in Fließrichtung rechten Hauptgerrine sichtbar.

Alternativ zu Echolotmessungen ist auch die Vermessung mit grünem Laser-scanner eine Möglichkeit. Es handelt sich um eine luftgestützte Methode, die es ermöglicht, tiefere, nicht watbare Gewässerzonen zu vermessen (Hilldale and Raff, 2007). Die Anwendung der Methode ist bislang beschränkt auf Zonen mit geringer Wassertrübung und begrenzter Tiefe (eigene Erfahrung: bis ca. 1,5 m). Die Methode wird allerdings kontinuierlich weiterentwickelt und es ist zu erwarten, dass in Zukunft auch tiefere Zonen erfasst werden können. Die Methode stand für die Untersuchungen in Bhutan jedoch nicht zur Verfügung.



Abbildung 4: Vermessung im Fluss Punatsangchhu mit Kajak, das mit Echolot und GNSS ausgestattet ist (li.), kombinierter Vermessungsdatensatz aus terrestrischer Querprofilvermessung, Echolotvermessung mit Kajak und SfM Auswertung

3.3 Nicht zugängliche und sehr heterogene Zonen

Eine für Vermessungen inzwischen häufig eingesetzte Methode ist die sogenannte Structure from Motion Methode (SfM, Westoby 2012). SfM basiert auf einem dem einfachen Zusammenhang, dass die verschiedenen Perspektiven, die man von Gegenständen und der Umgebung hat, wenn man den Standort wechselt, dazu verwendet werden können, dreidimensionale Informationen abzuleiten. Auf diese Weise wird auch dem Menschen das dreidimensionale Sehen ermöglicht, da das rechte Auge eine etwas unterschiedliche Perspektive im Vergleich zum linken Auge hat. Im Zusammenspiel mit einer Vielzahl von Bildauswertungen, die im menschlichen Gehirn ablaufen und bei denen auch Erfahrungswerte eine große Rolle spielen, kann der Mensch dadurch seine Umgebung dreidimensional erfassen. Diese Vorgänge können durch Bildauswertungssoftware nachgeahmt und damit aus fotografischen Aufnahmen dreidimensionale Modelle erstellt werden.

Die SfM Methode erwies sich in den untersuchten Gewässer in Bhutan als sehr hilfreich, weil sie einerseits eine schnelle Erfassung großer, schwer zugänglicher Flächen ermöglicht, andererseits wird eine hohe Dichte von Oberflächen-Informationen in Form sogenannten Punktwolken geliefert, welche es erlaubt, heterogene Gewässerabschnitte mit vielen Einzelstrukturen und komplexer Morphologie in ein DGM überzuführen. Obwohl die Methode bisher fast ausschließlich für Überwasserbereiche eingesetzt wird, da die Lichtbrechung im Wasser die Auswertung erschwert, haben eigene Versuche gezeigt, dass bei Ansatz geeigneter Umrechnungsmethoden auch Unterwasserbereiche erfasst werden können. Dadurch konnten für zusätzliche Zonen, die auch nach der Kajakbefahrung noch eine geringe Datendichte aufwiesen, Sohlpunkte erzeugt werden, die in den Überschneidungsbereichen gute Übereinstimmung mit den anderen Datensätzen aufwiesen.

Von großem Vorteil ist bei Anwendung von SfM, dass ein Nebenprodukt der Methode Orthofotos sind, welche die Modellerstellung deutlich vereinfachen.

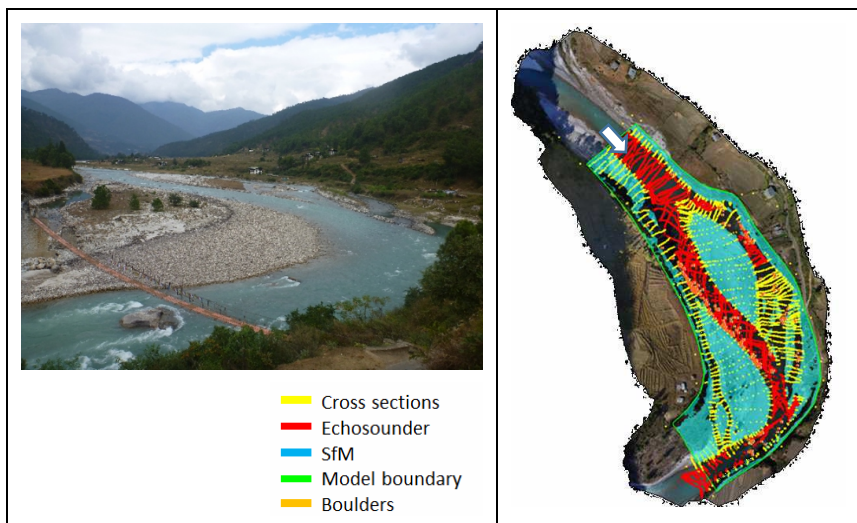


Abbildung 5: Untersuchungabschnitt des Flusses Phochhu (li.), kombinierter Vermessungsdatensatz aus terrestrischer Querprofil- und Felsblockvermessung, Echolotvermessung mit Kajak und SfM Auswertung

4 Fazit

Die Untersuchung von mehreren Fließgewässern in Bhutan stellten eine große Herausforderung für die Datenerhebung dar. Anhand speziell ausgestatteter Kajaks konnten topografische Informationen in auf andere Weise nicht zugänglichen Zonen erfasst werden. Die Verwendung der SfM Methode ermöglichte auf Basis von Fotos aus Drohnenbefliegungen und nachfolgender photogrammetrischer Auswertung die Erstellung von Punktwolken mit hoher Informationsdichte.

Durch die Überschneidung von

- a) terrestrischen Vermessungsdaten in begehbaren/watbaren Zonen,
- b) Echolotdaten in nur mit Kajak erreichbaren Zonen,
- c) Daten aus Befliegung und SfM Auswertung für stark heterogene und nicht zugängliche Überwasserzonen, sowie
- d) die Ergänzung von Unterwasserdaten über die SfM Methode mit speziellen Umrechnungsprozeduren zur Berücksichtigung der Lichtbrechung

konnten DGMs und daraus abgeleitet hydrodynamisch-numerische Modelle für sehr heterogene und schwierig zugängliche Gewässerabschnitte erstellt werden. Diese stellen die Basis für Habitatsimulationen dar, welche Bestandteil der in Bhutan eingeführten Richtlinie zur Ermittlung ökologisch begründeter Abflüsse (E-Flows) sind.

5 Literatur

- Bovee, K.D. and Milhous R.T. (1978). Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. Instream Flow Paper No.5, U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33, 130 p
- Chhopel, G. (2014). Sustainability of Bhutan's Hydropower. Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment, 14, 73-76. <https://doi.org/10.3126/hn.v14i0.11272>
- Hilldale, R.C. and Raff, D. (2008), Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. Earth Surf. Process. Landforms, 33: 773-783. doi:10.1002/esp.1575
- Lai, Y. (2008). SRH-2D version 2: Theory and User's Manual. Denver, Colorado: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center.

- Noack, M., Schneider, M. und S. Wieprecht (2013): The Habitat Modelling System CASiMiR: A Multivariate Fuzzy-Approach and its Applications. In: (eds.): Ecohydraulics: An integrated ap-proach. John Wiley & Sons, 8/2013.
- Schneider, M., Kopecki, I., Tuhtan, J., Sauterleute, J., Zinke, P., Bakken, T., Zakowski, T., Merigoux, S. (2016): A Fuzzy Rule-based Model for the Assessment of Macrobenthic Habitats under Hydropeaking Impact. River Research and Applications, 1467-1535
- Westoby, M. J.; Brasington, J.; Glasser, N. F.; Hambrey, M. J.; Reynolds, J. M. (2012). "'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications". Geomorphology. 179: 300–314.

Autoren:

Dr.-Ing. Matthias Schneider
Dr.-Ing. Iana Kopecki

SJE Ecohydraulic Engineering GmbH
Viereichenweg 12
D-70569 Stuttgart (Vaihingen)
Deutschland
Tel: +49-(0)711-677-3435
Fax: +49-(0)711-677-3436
schneider@sjeweb.de
kopecki@sjeweb.de

Dipl.-Ing. Christian Haas
Dipl.-Hydrol. Philipp Thumser

I AM HYDRO GmbH
Märtishofweg 2
78112 St. Georgen
Deutschland
Tel: +49 (0) 7724-9350124

christian.haas@iamhydro.com
philipp.thumser@iamhydro.com

Dr.-Ing. Klaus Jorde
KJ Consult
Ferdinand-Raunegger-Gasse 26
A-9020 Klagenfurt
Österreich
Tel: +43 463 204701
klaus.jorde@kjconsult.net

Durchgehende 3-D digitale Planung für die höchste Fischaufstiegsan- lage in den Niederlanden - Von der Idee bis zur Inbetriebnahme in nur 28 Monaten

Marq Redeker

Die Fischaufstiegshilfe Doesburg wurde mittels 3D-HN- und 3D-CAD-Modellierung durchgehend digital geplant. Die iterative digitale Planung machte es möglich, den ambitionierten Projektzeitplan einzuhalten und die fristgerechte Projektumsetzung zu sichern.

Stichworte: Fischaufstiegsanlage, Schlitzpass, 3D-CAD-Konstruktion, 3D-Strömungsmodellierung, BIM, CFD

1 Projektveranlassung

Im Rahmen des gemeinsamen Maßnahmenprogramms „Blauwe Knooppunten“ von *Rijkswaterstaat* und *Waterschap Rijn en IJssel* (Wasserverband) werden an insgesamt 22 Standorten an den Zuständigkeitsgrenzen (von Wasserstraße IJssel zu regionalen Gewässersystemen/Zuflüssen) verschiedenste gewässerökologische Maßnahmen umgesetzt, darunter auch fünf Fischaufstiegsanlagen (FAA) (Waterschap Rijn en IJssel, 2015). Der herausforderndste FAA-Standort ist Doesburg. Dort, unweit der niederländisch-deutschen Grenze, wird die *Oude IJssel* (dt. Issel) unmittelbar an der Mündung in die IJssel zur Gewährleistung der Schifffahrt aufgestaut. Die FAA Doesburg soll die stromaufwärts gerichtete Durchgängigkeit für Fische und andere Wasserlebewesen in das 1.208 km² große grenzübergreifende Issel-Einzugsgebiet wiederherstellen und die Biodiversität sowie das ökologische Potential verbessern.

2 Standortbedingungen

Das Stauziel der Staustufe Doesburg beträgt konstant 10,0 m+NAP. Der Unterwasserstand (IJssel) schwankt hingegen stark und ist u. a. beeinflusst von der Abflussaufteilung im Rhein-Maas-Delta. Mit Blick auf die konstruktive und hydraulische Auslegung der FAA war auch eine prognostizierte Sohleintiefung mit Wasserstandsabsenkung in der IJssel von 0,84 m binnen der nächsten 50 Jahre zu berücksichtigen (Rijkswaterstaat, 2017). Bei IJssel-Hochwasser können die Staustufe, die Schleuse und das umliegende Gelände überflutet werden; in den Jahren 1970 - 2017 betrug der Höchstwasserstand der IJssel elf Mal $>10,0$ m+NAP.

Der Mittelwasserabfluss der IJssel in Doesburg beträgt $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Lange Niedrigwasserperioden sind typisch für die IJssel. Während in nassen Jahren Q_{30} rund $4 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt, liegt Q_{30} in trockenen Jahren bei $0,34 \text{ m}^3/\text{s}$.



Abbildung 1: Luftbild der Staustufe Doesburg mit 5-feldrigem Wehr, fertiggestellter Fischaufstiegsanlage, Schleuse und Vorfluter (am unteren rechten Bildrand) (Bild: Waterschap Rijn en IJssel)

Das Umfeld der Staustufe ist z. T. Naturschutzgebiet, wird ober- und unterstrom aber auch intensiv von Stakeholdern, z. B. Sportboot- und Angelvereinen, genutzt. Eine Kreisstraße und ein Radweg queren die Schleuse, das FAA-Baufeld und das Wehr (Abbildung 1).

3 Konzept und Auslegung der Fischaufstiegsanlage

Die grundsätzliche Anordnung, Festlegung des Bautyps und Auslegung der FAA erfolgte im Rahmen einer Machbarkeitsstudie (CDM Smith & OAK Consultants, 2017).

Als geeignetste Lage für die FAA wurde der Wehrraum befunden, da die Schiffsschleuse wenig betrieben und der Schleusenarm nur intermittierend schwach durchströmt wird. Der FAA-Einstieg wurde unmittelbar am Ende der linken Wehrflügelwand (Tosbeckenende) positioniert, weil das Ufer unterstrom einen Rechtbogen beschreibt und dort die Hauptströmung anliegt.

Die FAA wurde im Austausch mit dem Wasserverband US-amerikanischen Richtlinien folgend auf Bemessungs-/Unterwasserstände UW_{18} und UW_{347} ($=W_{95\%}$ und $W_{5\%}$, vgl. USFWS 2017) ausgelegt. Vorgenannte prognostizierte Sohleintiefung berücksichtigend, wurde die FAA für Unterwasserschwankungen von 5 - 8,84 m+NAP und eine maximale Fallhöhe von 5 m bemessen. Die extremen Unterwasserschwankungen und begrenzte Flächenverfügbarkeit bedingten die Wahl eines Schlitzpasses (SP).

Um bei den stark schwankenden Unterwasserständen eine gute Leitströmung zu gewährleisten, wurde ein neues Einstiegskonzept mit Zusatzdotation umgesetzt (Heimerl et al., 2015; Redeker & Heimerl, 2018).

Höhere Unterwasserstände verursachen einen Einstau der unteren FAA-Becken. Bei UW_{347} reicht der Rückstau einfluss fast bis zum obersten Becken. Damit die Fließgeschwindigkeit in den Becken nie unter die rheoaktive Fließgeschwindigkeit (0,2 m/s für Cypriniden) sinkt, war eine zweite Dotationseinrichtung im unteren Beckenstrang erforderlich.

Von den fünf Programm-FAA sollte die FAA Doesburg explizit für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Der Wasserverband wünschte dazu eine (Besucher-)Fläche zwischen den beiden Beckensträngen, die gleichzeitig der Wartung der FAA dienen sollte. Die Zufahrt für Betriebsfahrzeuge wurde mittels einer Brücke über das Wendebecken realisiert. Die Brücke erzeugte jedoch ein rund 11 m langes Wendebecken. Die beiden 90°-Wenden wurden

neueren Erkenntnissen folgend jeweils als 2x45°-Wenden gestaltet (Gatzweiler et al., 2016).

IJssel und Issel sind Tieflandgewässer mit einer typspezifischen, überwiegend potamodromen Fischfauna der Brachsenregion. Als Bemessungsfisch wurde der Aland definiert. In den Niederlanden betragen die Wasserspiegeldifferenzen zwischen FAA-Becken i.d.R. um $\Delta h = 6\text{--}7\text{ cm}$ (Sportvisserij Nederland & Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2011). Als Kompromiss zwischen Entwicklungslänge bzw. Beckenzahl und Flächenbedarf wurde in Doesburg jedoch von der niederländischen FAA-Richtlinie abgewichen und die Wasserspiegeldifferenz der FAA-Becken gemäß Merkblatt DWA-M 509 (DWA, 2014) zu $\Delta h = 9\text{ cm}$ festgesetzt. Die Becken- und Trennwandgestaltung erfolgte ebenfalls konform dem Merkblatt DWA-M 509.

Die wesentlichen Kennwerte der FAA sind:

< Anzahl Becken:	54
< Beckenlänge:	2,40 m
< Beckenbreite:	1,85 m
< Min. Wassertiefe:	0,90 m
< Schlitzbreite:	0,28 m
< Bemessungswert der max. Fließgeschwindigkeit:	1,33 m/s
< Basisdurchfluss im SP:	0,30 m ³ /s
< Max. Zudotation:	0,70 m ³ /s
< Betriebsdurchfluss FAA:	0,7 – 1,0 m ³ /s
< Gesamtlänge:	167 m inkl. Ein-/Auslaufkanäle

Der Basisabfluss der FAA ist vergleichsweise niedrig, so dass selbst in trockenen Jahren eine lange Betriebsdauer gewährleistet ist. Aus staustufenbetrieblicher Sicht genießt die Schleuse (Schifffahrt) allerdings die höchste Priorität. Die FAA wurde daher mit einem automatisierten Einlaufschütz ausgestattet, so dass der Durchfluss in Trockenzeiten bei Bedarf gedrosselt werden kann.

4 Durchgehende 3D-digitale Planung des Bauwerks

Die Planung und Projektumsetzung musste Maßnahmenprogramm und Fördermittel bedingt in einem engen Zeitfenster erfolgen; der Baubeginn war für März 2018 terminiert (Redeker, 2018). Nach Vertragsschluss des Design & Build-Vertrags mit dem Bauunternehmen standen fünf Monate für die Ent-

wurfs-/Genehmigungsplanung sowie erste Ausführungs-/Detailplanungen zur Verfügung.

Der Einstieg mit Dotation, die zusätzliche Dotation in das SP-Becken sowie das langgezogene Wendebecken sind keine Standardbauten, die mithilfe von FAA-Regelwerken (z.B. Merkblatt DWA-M 509) bemessen werden können, sondern bedürfen einer individuellen Auslegung. Wir entschieden uns daher unmittelbar nach Beauftragung für eine durchgehende digitale Planung mittels 3D-HN-Modellierung (Software: *FLOW-3D*) und BIM-fähigem 3D-CAD (Software: AUTODESK® Revit).

Nach einer klassischen DWA-M 509-konformen Schlitzpassbemessung verglichen wir zunächst die Hydraulik der Standardbecken mit Resultaten einer 3D-HN-Modellierung. Die Berechnungsergebnisse bestätigten das gewünschte strömungsstabile Strömungsmuster (Abbildung 2) und die Wasserspiegeldifferenz. Der Betriebsabfluss von Tabellenkalkulation und HN-Modellierung differierte um 4,8%.

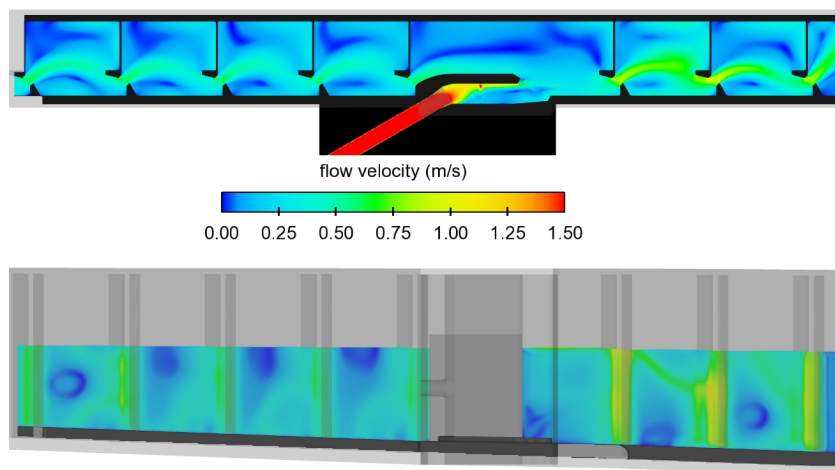


Abbildung 2: Strömungsmuster im Schlitzpassbecken mit Zudotation bei UW-Stand 7,20 m+NAP, 0,3 m³/s Basisabfluss und 0,2 m³/s Dotation (Oben: Horizontalschnitt bei mittlerer Wassertiefe; Unten: Längsschnitt in Beckenmitte)

Die Auslegung der o. g. FAA-Sonderbauteile führten wir iterativ mittels 3D-HN-Modellierung durch. Der Vorteil der digitalen 3D-Planung zeigte sich rasch bei der Auslegung des SP-Beckens mit Zudotation (Abbildung 2), dessen Länge die Beckenaufteilung in bzw. zwischen den beiden Beckensträngen

beeinflusste. Vor den einzelnen Modellläufen konnten die konstruktiven Modifikationen im CAD-Modell zügig umgesetzt und im stl-Format (Außenflächen/Vektorisierung musste nachbearbeitet werden) ins HN-Modell übertragen werden.

Die Konzeption des Einstiegs mit Dotation stellte die herausforderndste Detailplanung dar. Das HN-Modell beinhaltete einen Ausschnitt der Wehrabströmung und Bathymetrie im Unterwasser, den Einstiegskanal mit regulierbarem Auslaufftor, die Dotation mit Feinrechen sowie die untersten SP-Becken (Abbildung 3). Unter anderem wurden Ausströmwinkel, Toranschlag und Ausbildung/Länge des Dotationsbeckens optimiert und diese für verschiedene Unterwasserstände sowie Durchflüsse modelliert. Angesichts des limitierten Planungszeitraums legten wir zu Modellierungsbeginn ein Optimum von Modellgittergröße und resultierenden Rechenlaufzeiten fest.

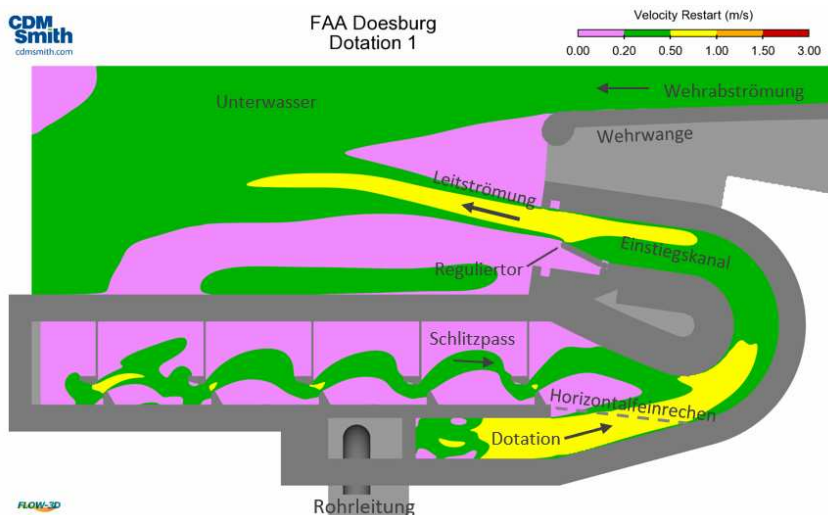


Abbildung 3: Strömungsmuster am FAA-Einstieg bei UW-Stand 6,0 m+NAP und 1 m³/s FAA-Durchfluss. Horizontalschnitt 30 cm unter WSP; Leitströmung $v_{a,m} = 0,53$ m/s. Ergebnisdarstellung mit ichthyologischer Geschwindigkeits-/Farbskala.

Bei allen HN-Modellen half die Ergebnisdarstellung mit einer ichthyologischen Geschwindigkeits-/Farbskala (Abbildung 3) bei der Interpretation der Modellierungsergebnisse mit den beteiligten Fischereibiologen.

Die vorab durchdachte Parametrisierung der Schlitzpassbecken-Familie im Revit-Modell reduzierte den Aufwand konstruktiver Änderungen enorm.

Beispielsweise konnte eine Umstellung der Trennwände in Stahlbetonbauweise auf Stahlkonstruktion (Abbildung 4) zum Zwecke der Abwicklungslängenreduzierung praktisch in wenigen Minuten planerisch-konstruktiv umgesetzt werden.



Abbildung 4: Trennwände wurden zur Reduzierung der Bauwerkslänge in Stahlbauweise ausgeführt (Bild: Redeker, 27.09.2019)

5 Erfahrungen mit der 3D-digitalen Planung

Die 3D-CAD-Konstruktion bietet sich der Erfahrung nach bei „technischen“ Beckenpässen an. Eine Parametrisierung der Becken-Familie macht insbesondere dann Sinn, wenn sich Parameter, z. B. Becken-/Trennwandgeometrie oder Gefälle, im Laufe der Planung ändern können.

Das 3D-CAD-Modell bzw. die verschiedenen Bauwerksteile waren gleichzeitig Basis für die 3D-Strömungssimulationen. Auf diese Weise konnte bereits in der Planung beurteilt werden, ob die gewünschten Strömungsmuster sowie hinreichende Strömungsgeschwindigkeiten im Wanderkorridor bei allen Betriebswasserständen vorherrschen werden.

Der Datenaustausch zwischen den beteiligten Disziplinen und dem Bauunternehmen war mit dem Revit-Modell reibungslos möglich und erfolgte entweder im nativen Format oder offenen ifc-Standard. Das Modell wirkte Kollisionen der verschiedenen Gewerke vor.

Von großem Vorteil erwies sich die 3D-Planung insbesondere in der Interaktion-/Kommunikation mit fachlichen Laien, wie lokalen Stakeholdern und dem Finanzausschuss des Wasserverbands, denn die einhergehende Visualisierbarkeit vereinfacht das Projekt- bzw. Bauwerksverständnis außerordentlich (Abbildung 5). Autodesk® bietet mit seinem sog. „Viewer“ die Möglichkeit die Konstruktion über eine URL freizugeben; der Empfänger muss weder Software installieren noch sich anmelden, um sie anzuzeigen. Auf diese Weise kann ein Planungsstand jederzeit mit Projektpartnern geteilt werden, die sich das Planungsobjekt rundum und in allen Details betrachten können.

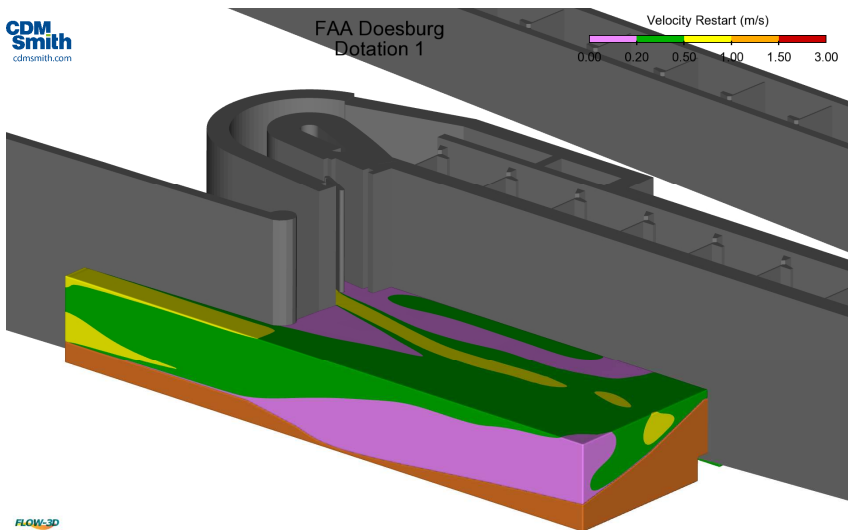


Abbildung 5: Unterwasserseitige Visualisierung des Leitströmungsmusters am Einstieg der Fischaufstiegsanlage

Auch für Visualisierungs-/Marketingzwecke kann das 3D-Modell als Bild und Video gerendert werden (Abbildung 6).



Abbildung 6: Visualisierung der Fischaufstiegsanlage Doesburg auf Basis des 3D-CAD-Modells

Die 3D-Planung und die einhergehenden 3D-hydraulischen Simulationen haben sich bewährt: Die iterative digitale FAA-Planung konnte einen wesentlichen Beitrag zur Einhaltung des ambitionierten Planungszeitplans von nur fünf Monaten für die Entwurfs-/Genehmigungs- und Ausführungsplanungen und zur fristgerechten Projektumsetzung liefern. Dem feierlichen Spatenstich zum *World Fish Migration Day* am 21. April 2018 stand damit nichts im Weg. Die FAA Doesburg konnte nach nur 28 Monaten Planungs- und Bauzeit in Betrieb genommen werden.

6 Literatur

- CDM Smith & OAK Consultants (2017): Vispassage Doesburg – Ontwerp-notitie voorontwerp vertical slot vispassage. 18.05.2017, unveröffentlicht
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2014): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Merkblatt DWA-M 509, Hennef, 334 S.
- Gatzweiler, J., Lehmann, B., Mewis, P. & Redeker, M. (2016): Eignung von 3-D-HN-Modell zur hydraulischen Optimierung von Umlenkebecken von Beckenpässen. *Wasserwirtschaft* 7/8/2016, S. 18-24

- Heimerl, S., Redeker, M. & Weichert, R. (2015): Überlegungen zur Gestaltung von Einstiegen in Fischaufstiegsanlagen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 521-529
<https://hdl.handle.net/20.500.11970/103410>
- Redeker, M. & Heimerl, S. (2018): Improved Fish Pass Entrance Design Involving Surplus Attraction Flow. Daniel Bung, Blake Tullis, 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 15-18 May. doi: 10.15142/T3WS9R (978-0-692-13277-7)
<https://digitalcommons.usu.edu/ishs/2018/session4-2018/9/>
- Redeker, M. (2018): Innovative Planung für die höchste Fisch-aufstiegsanlage der Niederlande. Wasserwirtschaft 6/2018, S. 113
- Rijkswaterstaat (2017): Verkenning ontwikkeling laagwaterstanden Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel. 21.04.2017, unveröffentlicht
- Sportvisserij Nederland & Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2011): Vismigratie - Een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland, 205 S.
- U.S. Fish and Wildlife Service (2017): Fish Passage Engineering Design Criteria. USFWS, Northeast Region R5, Hadley, Massachusetts, 224 S.
- Waterschap Rijn en IJssel (2015): Waterbeheerplan 2016-2021. November 2015
www.wrij.nl/publish/library/22/waterbeheerplan_2016-021_waterschap_rijn_en_ijssel.pdf.

Autor:

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Marq Redeker

CDM Smith
Münsterstraße 304
40470 Düsseldorf

Tel.: +49 211 93445-16
Fax: +49 211 93445-57
E-Mail: marq.redeker@cdmsmith.com

Zum Einsatzpotenzial des terrestrischen Laserscanning (TLS) in der wasserbaulichen Praxis

Jens-Uwe Wiesemann
Lukas Priebe
Florian Schill

Im Rahmen der Planung, der modelltechnischen Überprüfung und der Überwachung wasserbaulicher Fragestellungen und Projektvorhaben gewinnt die Aufnahme von Bauwerkskonturen, Geometrien, Sohllagen sowie Rauigkeiten mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) zunehmend an Bedeutung.

In diesem Beitrag wird zunächst auf die Grundlagen der 3D-Vermessung mittels TLS eingegangen und dabei insbesondere die Anforderungen im Wasserbau thematisiert.

An zwei ausgewählten wasserbaulichen Beispielen soll darauf aufbauend das Anwendungspotenzial von TLS aufgezeigt werden. Dabei liegt der Schwerpunkt auf einer physikalischen Modelluntersuchung zu Erosionsprozessen bzw. der Kolkentwicklung einer Hochwasserentlastungsanlage und darüber hinaus auf der Bauteilverformung eines Wasserbehälters infolge der Belastung durch dessen Füllstand.

Stichworte: terrestrisches Laserscanning (TLS), Bauüberwachung, Bauwerksgeometrie, Geländetopographie, Bathymetrie, Morphologie, Kolkung

1 Einleitung

In der wasserbaulichen Praxis treten häufig Fragestellungen auf, bei denen u. a. flächenhafte Geometrieinformationen von Interesse sind. Dies trifft in diesem Zusammenhang sowohl auf die Erfassung von absoluten Geometrien, aber auch von Geometrieveränderungen zu. Beispiele dafür sind u. a. morphologische Veränderungen infolge von Erosions- und Auflandungsprozessen durch lokale Strömungserscheinungen z. B. bei Hochwasserentlastungsanlagen (HWEA).

Konventionelle Vermessungsmethoden liefern im Allgemeinen lediglich punktuelle Information und/oder sind sehr aufwendig. Durch die Entwicklung im Bereich des terrestrischen Laserscannings (TLS) eröffnen sich neue Möglichkeiten zur effizienten Erfassung von flächenhaften Messdaten (Punktwolken) bei begrenztem Aufwand.

Im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten im Themenfeld Wasserbau und TLS siehe u. a. *Rupprecht et al. (2009)*, *Czerny et al. (2010)* und *Tschirschwitz et al. (2016)*, befasst sich dieser Beitrag nicht mit der Erfassung der Situation vor Ort /im Gelände, sondern mit Laboruntersuchungen im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt bzw. in deren Umfeld. Dazu wird neben den Grundlagen des TLS, die Anwendung an zwei Beispielen veranschaulicht:

- ◀ Physikalische Modelluntersuchung zu Erosionsprozessen und der Kolkentwicklung (bei einer Hochwasserentlastungsanlage)
- ◀ Bauteilverformungen an einem Wassertank infolge sich ändernder Belastung

2 Grundlagen des terrestrischen Laserscanning (TLS)

Terrestrische Laserscanner (TLS, siehe Abbildung 1) ermöglichen eine berührungslose Erfassung der gesamten Umgebung in einem 360°-Panorama

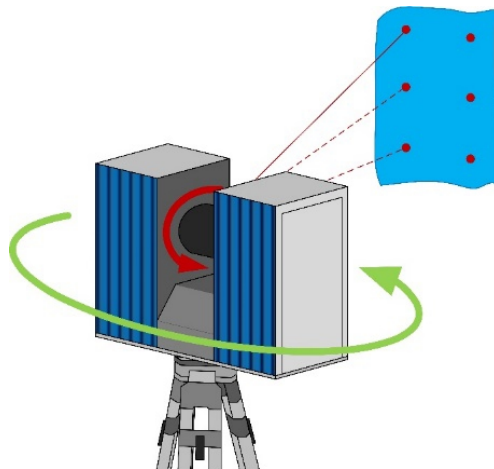


Abbildung 1: Prinzip der sequentiellen Abtastung mit einem TLS.

Dazu emittiert der TLS einen Laserstrahl, welcher an den Objektoberflächen im Raum reflektiert wird. Der reflektierte Laserstrahl wird vom TLS ausgewertet und in eine dreidimensionale Koordinate umgerechnet. Zusätzlich zu den 3D-Koordinaten liegt für jeden erfassten Messpunkt ein Intensitätswert der Lasermessung vor, eine Art Falschfarbendarstellung, die auf dem Verhältnis der ausgesendeten zur empfangenen Laserstärke basiert.

Während des Scanvorgangs wird der Laserstrahl über einen rotierenden Spiegel abgelenkt (siehe Abbildung 1 in rot) und zusätzlich dreht sich der Laserscanner um seine Stehachse, siehe Abbildung 1 in grün. Durch diese sequentielle Erfassungsmethode entsteht eine hochaufgelöste digitale Punktwolke im Bereich eines 360°-Panoramas um den TLS.

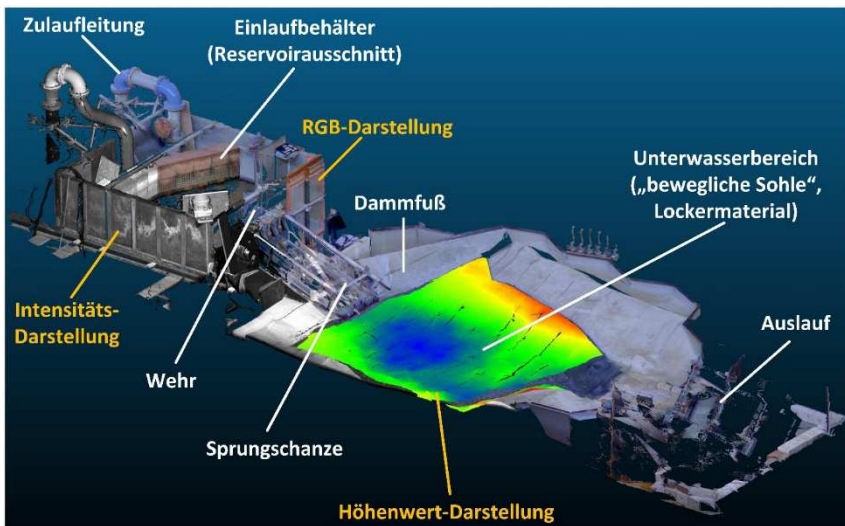


Abbildung 2: 3D-Punktwolke eines physikalischen Modells zur Untersuchung von Erosionsprozessen. Zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitäts-, RGB- und Höhen-Werte (Regenbogen).

In Abbildung 2 ist zunächst das Endergebnis einer 3D-Erfassung mittels TLS dargestellt. Die Abbildung soll einerseits einen Auszug der Darstellungsmöglichkeiten für eine Punktwolke aufzeigen (gelbe Beschriftung) und andererseits das physikalische Modell, auf das in Kapitel 3 näher eingegangen wird, charakterisieren (weiße Beschriftung). Gegenüber konventionellen Messmethoden führt der Einsatz von TLS zu einer deutlich umfangreicheren Datengrundlage bei dennoch überschaubarem Zeitaufwand. Die Mes-

sung eines 360°-Panoramas mit einem Punktabstand von 3,1 mm in einer Objektentfernung von 10 m benötigt in etwa 7 Minuten, siehe *Zoller+Fröhlich (2020)*. Für eine feinere Diskretisierung (geringerer Messpunkt-
abstand) erhöht sich die Messdauer entsprechend. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die vom TLS aufgenommene Punktwolke mit RGB-Farbinformationen zu überlagern (siehe Abbildung 2 RGB-Darstellung), dafür sind aktuelle TLS-Modelle in der Regel mit einer internen Kamera ausgestattet.

Werden mehrere Punktwolken von unterschiedlichen Standpunkten oder für Vergleichszwecke erfasst, so müssen diese zunächst in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden, dies wird in Kapitel 3 weiter thematisiert.

3 Anwendungsbeispiel: Erfassung von Kolkgeometrien bzw. morphologischen Veränderungen (Erosion & Auflandung)

In Abbildung 3 ist der Unterwasserbereich des zuvor thematisierten physikalischen Modells einer HWEA abgebildet. Dabei handelt es sich um eine HWEA mit Sprungschanze. Dieser Anlagentyp wird häufig in engen Tälern und bei großen Stauhöhen eingesetzt und ist eine Variante, die den Hochwasserabfluss mithilfe eines Schanzenbauwerks in einen Freistrahl umwandelt, der in möglichst großer Entfernung zu schützenswerten Strukturen auf das Unterwasser auftrifft. Da der Großteil der kinetischen Energie des Freistrahls erst im Unterwasser dissipiert, kommt es dabei häufig zu einer ausgeprägten Erosion der Flusssohle, die die Bildung eines Kolks zur Folge hat.

Um eine Gefährdung von schützenswerten Strukturen durch Erosion zu vermeiden, ist eine fundierte Aussage über das Ausmaß sowie die zu erwartende Lage der Auskolkungen notwendig. Hierfür eignen sich insbesondere hydraulische Modelle mit beweglicher Sohle. Für die Beurteilung von Kolkungsprozessen ist die Aufnahme des Urzustandes des betreffenden Gewässerbereichs und der Zustand eines entwickelten Kolks grundlegend. Im Zuge von Optimierungen lassen sich beispielsweise verschiedene Sprungschanzenentwürfe untersuchen, die durch zusätzliche Einbauten unterschiedliche Auswirkungen auf die Kolkung haben. Insbesondere für die Beurteilung dieser Auswirkungen auf den Kolkungsprozess bieten TLS eine äußerst umfangreiche (digitale) Datenbasis.



Abbildung 3: Modellbereich mit beweglicher Sohle -Unterstromseitige Ansicht- (Schussrinne, Sprungschanze, Dammfuß und „Plunge Pool“-Bereich).

Mit dem TLS wurde jeweils vor und nach den einzelnen Versuchen eine komplette Erfassung des Modells durchgeführt. Für eine weiterführende Analyse unterschiedlicher Kolkgeometrien müssen jedoch alle Punktwolken des aufgenommenen Modells in einem identischen Koordinatensystem vorliegen.

Klassischerweise werden zur Transformation der Punktwolken externe künstliche Zielzeichen (Passkugeln oder Zielmarken) verwendet. Neuere Ansätze ermöglichen jedoch auch die Transformationsparameter basierend auf bereits in den Scandaten vorhandenen geometrischen Primitiven (z. B. Ebenen) zu bestimmen, siehe *Scantra (2020)*. Der entscheidende Vorteil ist, dass so keine Zielzeichen ins Modell eingebracht werden müssen. Somit sind auch Messungen zu unterschiedlichen Projektphasen miteinander vergleichbar, da die Transformation über vorhandene identische Ebenen an Wänden oder der Decke erfolgen kann, d. h. der TLS muss auch zwischenzeitlich nicht an Ort und Stelle verbleiben.

Um einen effizienten und flexiblen Einsatz des TLS in der wasserbaulichen Versuchshalle zu gewährleisten, wurde für alle Auswertungen der auf natürlichen geometrischen Primitiven basierende Ansatz verwendet. Die anschließende Auswertung und Darstellung der transformierten Punktwolken wurde mit der Open-Source-Software CloudCompare durchgeführt, siehe *CloudCompare (2020)*.

3.1 Erfassung der absoluten Geometrie

In Abbildung 4 ist zunächst der veränderliche Modellbereich, die aufgenommene Kolkgeometrie, für 3 Modellversuche (V1, V2 und V3) dargestellt, vgl. auch Abbildung 3. Die Punktwolke ist anhand ihrer z-Koordinate (Höhe) eingefärbt.

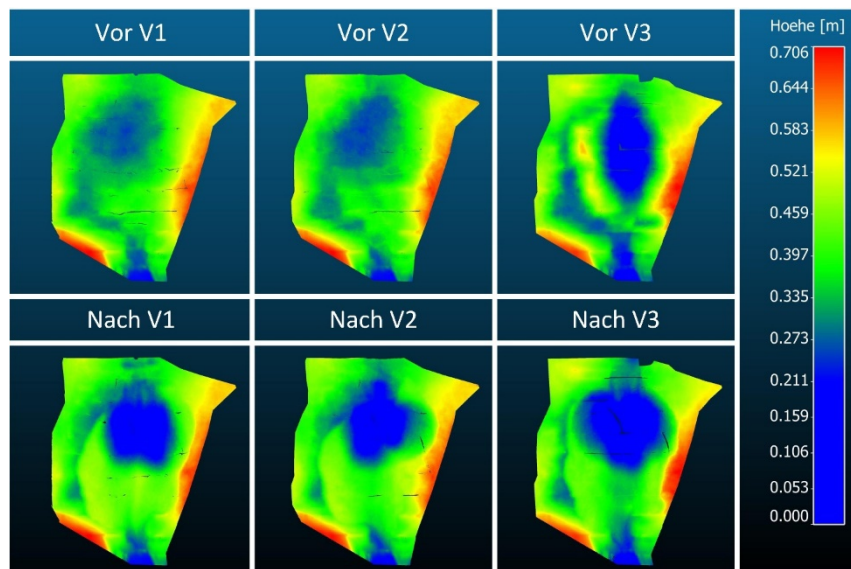


Abbildung 4: Höhendarstellung des veränderlichen Modellbereichs für drei Versuche (jeweils vor und nach der Versuchsdurchführung). Der Zufluss über die Sprungschanze fand jeweils von oben statt, vgl. Abbildung 2 bzw. Abbildung 3.

Im Zuge der Auswertung der TLS-Messdaten können dabei sowohl die Ausgangszustände als auch die Endzustände miteinander verglichen werden. In den Versuchen V1 und V2 wurde ein für den Versuchsstart grob eingeplanter Ursprungszustand eingemessen und für den Versuch V3 ein definierter Voraushub, um dem Kolkprozess ein Initialvolumen vorzugeben, siehe Abbildung 4 in der oberen Zeile.

Die Versuche V1 und V2 zeigen eine sich nach stromabwärts ausbreitende Verlandung des Senkenbereichs (ehemaliges Flussbett), wohingegen bei Versuch V3 durch den Voraushub weniger Material nach stromabwärts ausgetragen wird und die Auflandung geringer ausfällt, siehe Abbildung 4 in der unteren Zeile. Auffallend ist beim Versuch V3 die Annäherung der Kolkform an die auch durch die Versuche V1 und V2 erzeugten Kolkgeo-

metrien. Bei Versuch V3 wächst der Kolk in die Breite, allerdings verbleibt im Gegensatz zu den Versuchen V1 und V2 eine Vertiefung am unteren Kolkende, welche durch den Voraushub schon gegeben war und nicht durch den Kolkungsprozess verstärkt wurde.

Weitere Auswirkungen von baulichen Maßnahmen sind aus dem Vergleich der Endzustände der Versuche V1 und V2 zu erkennen. Die Sprungschanze wurde bei Versuch V2 durch eine Zahnschwelle verändert, was sich in einer etwas länglicheren Kolkform zeigt. Zusätzlich wurde bei Versuch V2 einseitig ein Deflektor angebracht, welcher sich durch eine reduzierte Auskolkung im Bereich des steileren Böschungsbereichs auswirkt und durch die eine Verzerrung am unteren Kolkbereich zu erkennen ist.

3.2 Geometrieveränderung

Aus den TLS-Aufnahmen der einzelnen Versuche (vgl. Abbildung 4) kann neben der absoluten Geometrie auch die Geometrieveränderung im Modellbereich berechnet werden, siehe Abbildung 5. Dazu wird jeweils die Differenz der z-Koordinatenwerte gebildet.

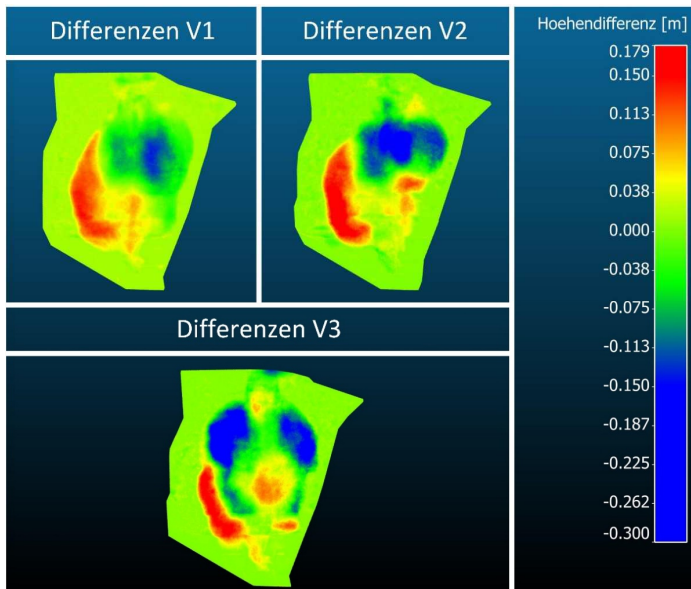


Abbildung 5: Höhenänderungen (Differenzen) aus drei Modellversuchen „Vorher-Nachher“ für die Abbildung 4.

In Abbildung 5 sind die Höhenänderungen (Differenzen „vorher zu nachher“) für die drei Modellversuche dargestellt. In den Differenzen von Versuch V2 ist deutlich die ausgeprägte positive Höhendifferenz im unteren rechten Bildbereich (Böschungsbereich) zu erkennen. Hier wird durch die angepasste Sprungschanzeengeometrie der HWEA eine Reduzierung der böschungsnahen Erosion erwirkt. Ebenso erkennbar ist die im Vergleich zu Versuch V1 verstärkte Kolkung im oberen Bereich, die durch die strahlaufreißende Wirkung der Schanzenanpassung verursacht wird, da so der Freistrah schon verstärkt im oberen Bereich auf das Flussbett trifft.

Bei den Differenzen von Versuch V3 ist dagegen die Aufweitung des Kolks klar zu erkennen. Eine deutliche Vertiefung ist nur in den seitlichen Zonen zu verzeichnen, im mittleren Bereich sind die Differenzen aufgrund des Voraushubs gering und nach unten landet sich das ausgetragene Bettmaterial innerhalb des Voraushubbereichs zum Teil wieder an.

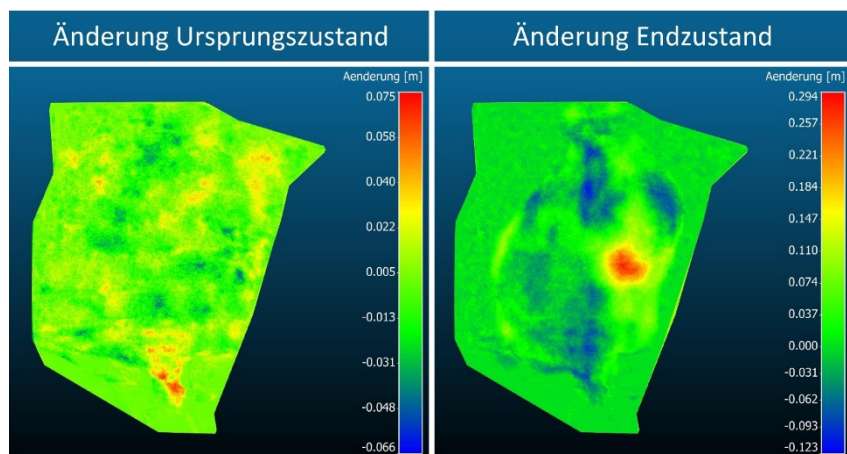


Abbildung 6: Versuchsübergreifende Auswertung der Geometrieveränderung.

Neben dem Vergleich der Höhenänderungen innerhalb eines Versuches, wird durch die effiziente Transformation aller Messungen in ein einheitliches Koordinatensystem (ohne Abhängigkeit von externen Zielzeichen) auch eine versuchsübergreifende Quantifizierung ermöglicht. Damit bieten sich neue Möglichkeiten der Versuchsbewertung, z. B. lassen sich die Ursprungszustände von Versuchen miteinander vergleichen, siehe Abbildung 6 linke Seite. So kann gezeigt werden wie gut ein definierter Ausgangszustand wiederhergestellt wurde, wie z. B. das „Einebnen“ vor Versuchsbeginn. Somit lassen sich die eigentlichen Ergebnisse (Geometrieänderung)

unterschiedlicher Versuche besser beurteilen, insbesondere im Kontext der Messunsicherheit.

Es zeigen sich bei der Änderung des Ursprungszustands im eigentlichen Kolkbereich Höhendifferenzen, die bei der Beurteilung der Kolkgeometrie von eher untergeordneter Bedeutung sind. In den Randbereichen spielen die Änderungen im Zuge der Beurteilung von Auflandungsprozessen durchaus eine etwas gewichtigere Rolle, weshalb für eine umfängliche Analyse zukünftig der Fokus durchaus auch auf einen Vergleich von Ursprungszuständen gelegt werden sollte.

Abschließend wird so auch eine detaillierte Beurteilung der Auswirkungen, die durch Anpassungen am Modell induziert werden, ermöglicht (siehe Abbildung 6 rechte Seite). Es kann exakt festgestellt werden welche Auswirkung eine Änderung der Sprungschanzengeometrie einer HWEA auf die Kolkbildung im Unterwasserbereich hat, d. h. welche Änderungen beim Auf- bzw. Abtrag von beweglichem Sohlmaterial entstehen. Die im rechten Bild zu erkennende Änderung der Endzustände von Versuch V1 und V2 verdeutlicht eindrucksvoll die Wirkung der geänderten Sprungschanzengeometrie mit der eingebauten Zahnschwelle und der seitlichen Deflektorwand.

4 Anwendungsbeispiel: Bauwerksvermessung eines Wasserbehälters

Zur Nutzung der hydrothermischen Energie von Fließgewässern wurde ein Prüfstand für die Untersuchung von Wärmetauschern aufgebaut, siehe Abbildung 7. Im Betrieb übergibt dabei eine Wärmequellenanlage einen Teil der hydrothermischen Energie aus dem Fließgewässer an den Kältekreislauf einer Wärmepumpe, simuliert durch einen Tauchstrahl in einem Wasserbehälter.

Ein wesentlicher Bestandteil des Versuchsaufbaus ist der offene Wasserbehälter, der durch mobile Hochwasserschutz Elemente gebildet wird. Im Zuge des Betriebs des Prüfstands und der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit der verwendeten Systemkomponenten stand auch eine mögliche Bauteilverformung im Fokus, da insbesondere die Anforderungen bezüglich der Dichtigkeit bei sich ändernden Belastungen zu beachten waren.

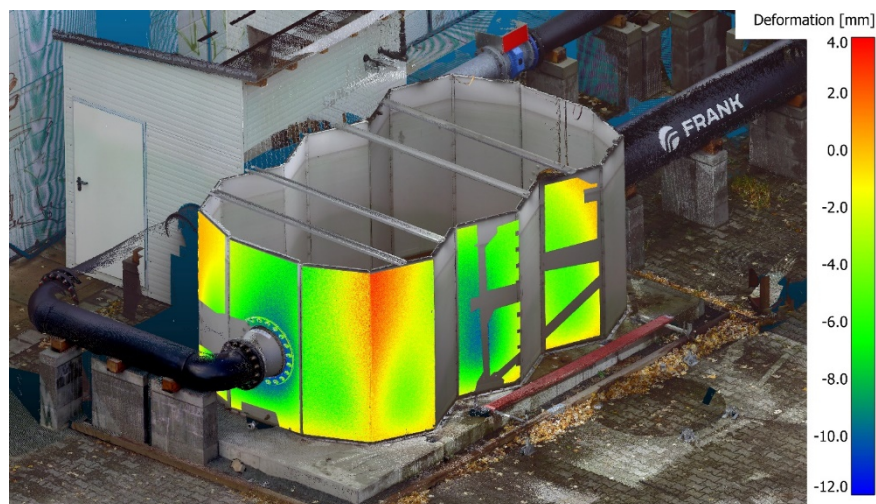


Abbildung 7: Wasserbehälter (Prüfbecken) mit farbcodierter Deformation aufgrund des Füllstandes.

Mit dem TLS war es möglich, den Wassertank im leeren sowie im komplett mit Wasser gefüllten Zustand zu scannen. Diese beiden Aufnahmen erlauben eine Auswertung der Deformation der Tankaußenwände. Da in diesem Fall die Deformation senkrecht zur jeweiligen Tankaußenfläche von Interesse war wurde die Punktwolke des leeren Zustandes zunächst trianguliert, so dass darauf basierend die Deformation in Normalenrichtung der triangulierten Ebenen berechnet werden konnte (Cloud-to-Mesh Distanz).

Das Endergebnis ist in Abbildung 7 zu sehen. Hierbei zeigen positive Deformationen (rot) ins Innere des Tanks, negative Deformationen (grün-blau) nach außen und gelb-orangene Bereiche nahezu keine Deformation. Die erkennbaren Lücken in der Farbcodierung wurden durch ein Baugerüst verursacht, das aus Übersichtlichkeitsgründen aus Abbildung 7 entfernt wurde.

Die Auswertung der TLS-Punktwolken ermöglicht eine äußerst anschauliche Darstellung des Deformationsverhaltens des Wassertanks. Aufgrund des Füllstands beult sich die Tankhülle im unteren Bereich nach außen aus, wohingegen sich die Tankhülle in der Umgebung der an der Tankoberseite angebrachten Verstrebungen nach innen schiebt.

Die maximalen Deformationen liegen im Bereich des Rohrauslasses am Ende des Wasserbehälters (linke Bildseite) und an der mittleren Seitenwand. Die Deformationen betragen bis zu 12 Millimetern:

- ◁ Die maximale Deformation im Bereich des Rohranschlusses wird durch die abgehende Rohrleitung, welche bei Befüllung als zusätzliche Last wirkt, verursacht.
- ◁ An der mittleren Seitenwand ist zu erkennen, dass im oberen Bereich keine Verstrebung mit der entgegengesetzten Seite vorhanden ist, dementsprechend entstehen hier auch größere Deformationen als an vergleichbaren Wandteilen.

5 Ausblick

Mit dem vorliegenden Beitrag konnte gezeigt werden, dass bei ausgewählten wasserbaulichen Anwendungen ein deutliches Potenzial für den Einsatz von TLS-Messungen existiert und diese mit Fokus auf potenzielle Analysen ein wertvolles Werkzeug bei der Planung, Ausführung und der Überwachung darstellen.

Wesentliche Aspekte einer physikalischen Modelluntersuchung zu Erosionsprozessen und der Kolkentwicklung einer HWEA werden durch den Einsatz eines TLS besser darstellbar und in ihrer Tiefe verstärkt analysierbar. Neben der umfangreichen digitalen Datenbasis ist insbesondere auch die Möglichkeit versuchsübergreifender Vergleiche, ohne Abhängigkeit von externer Infrastruktur hervorzuheben. D. h. es kann explizit festgestellt werden, wie sich Änderung an den Versuchsparametern auf die Kolkung bzw. die Kolkgeometrie auswirken.

Im Kontext von Bauteilverformungen lassen sich mittels TLS-Messungen Rückschlüsse auf die tatsächliche Gebrauchstauglichkeit der Systemkomponenten ziehen, hier am Beispiel eines Wassertanks. Erst der Einsatz eines TLS ermöglicht die Erfassung von räumlich aufgelösten Deformationen mit vertretbarem Aufwand und bietet so das Potenzial das Verformungsverhalten der einzelnen Bauteile detailliert zu untersuchen.

Ein Anknüpfungspunkt für zukünftige Anwendungen könnte der Einsatz von TLS zur Erfassung von Sohllagen durch Wasseroberflächen hindurch sein. Diese Methodik soll als Forschungs- und Entwicklungsziel aufgegriffen werden. Hierbei ist die Brechung des Lichtstrahls beim Auftreffen auf die Grenzfläche Luft/Wasser bei der Datenauswertung zu berücksichtigen. So

könnten sich neben der Vermessung eines Endzustands auch dynamisch-morphologische Entwicklungen während der laufenden Versuchsdurchführung erfassen lassen.

6 Literatur

- CloudCompare (Version 2.10.2) [GPL-Software], (2020), bezogen von <http://www.cloudcompare.org/> (zuletzt aufgerufen 13.01.2020)
- Czerny R., König F., Oberle P., Lehmann B., Nestmann F. (2010): Werkzeuge zur Bewertung urbaner Fließgewässer. 33. Dresdner Wasserbaukolloquium „Wasserbau und Umwelt: Anforderungen, Methoden, Lösungen“, 17. und 18. März 2010, Dresden, Germany, S. 485-494
- Rupprecht R., Zippelt K., Oberle P. (2009): Terrestrisches Laserscanning als Grundlage für die hydraulische Gewässermodellierung. WasserWirtschaft 05/2009, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden/Germany, S. 14-19
- Scantra (Version 2.3), technet GmbH, (2020), <https://www.technet-gmbh.com/produkte/scantra/> (zuletzt aufgerufen 13.01.2020)
- Tschirschwitz F., Mechelke K., Jansch H., Uliczka K., Kersten T. (2016): Ein automatisches Monitoringsystem für Bühnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning, In: ZfV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 141,5, S. 297-305
- Zoller+Fröhlich (2020): Z+F Imager 5016 Datenblatt, <https://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5016.184.0.html> (zuletzt aufgerufen 13.01.2020)

Autoren:

Dr.-Ing. Jens-Uwe Wiesemann

Lukas Priebe, M Sc.

Dr.-Ing. Florian Schill

FG Wasserbau und Hydraulik
Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Str. 7
64287 Darmstadt

FG Geodätische Messsysteme und Sensorik
Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Str. 7
64287 Darmstadt

Tel.: +49 6151 16 21169

Tel.: +49 6151 16 21827

+49 6151 16 21915

E-Mail:
wiesemann@wb.tu-darmstadt.de

E-Mail:
priebe@geod.tu-darmstadt.de
schill@geod.tu-darmstadt.de

Mobiles Laserscanning zur hochauflösenden, genauen und vollständigen Erfassung von Seeufern

Robert Blaskow
Danilo Schneider

In vielen Anwendungen ist es notwendig die Uferbereiche von Gewässern messtechnisch dreidimensional zu erfassen, beispielsweise zur Planung von Uferschutzmaßnahmen oder regelmäßig zum Gewässer-Monitoring. Die vollständige Aufnahme kann bei langen Uferlinien mit konventionellen Messmethoden sehr zeitaufwändig sein. In diesem Beitrag wird die Vermessung des Spreetaler und des Sabrodtter Sees mit einem mobilen Laserscannersystem vorgestellt. Zum Schließen von nicht sichtbaren Bereichen wurde die Messung punktuell mit terrestrischem Laserscanning und mit UAV-gestützten photogrammetrischen Verfahren ergänzt. Es resultiert eine nahezu vollständige Punktwolke der jeweils mehr als 8 km langen Uferlinie mit einem Punktabstand von wenigen Millimetern, die durch eine Dreiecksvermaschung zu einem hochgenauen Oberflächenmodell weiterverarbeitet wurde.

1 Einleitung



Abbildung 1: Mobiles Laserscanningsystem Riegl VMZ im Einsatz

Mit konventionellen Verfahren kann die räumliche Erfassung von Uferlinien zwar sehr genau, jedoch lediglich punktuell erfolgen (z.B. tachymetrische Vermessung). Für die Erfassung größerer Bereiche bietet sich die Nutzung hochaufgelöster Satellitendaten an, wobei die räumliche Abtastung meist zu gering und die Höhengenaugigkeit für die meisten Anwendungen oft nicht ausreichend ist. Alternativ können mit Airborne Laserscannern (ALS) oder mit Kameras ausgerüstete Flugzeuge die Uferbereiche erfassen, was jedoch kostenintensiv und außerdem wetterabhängig ist. Erschwerend kommt sowohl bei satelliten- als auch luftgestützten Verfahren hinzu, dass die Uferbereiche mit Bäumen und Sträuchern bewachsen sind und die Erfassung der relevanten Oberfläche aus dieser Perspektive dann nur eingeschränkt erfolgen kann.

In diesem Beitrag wird die Vermessung von Uferlinien mit einem mobilen Laserscannersystem (MLS) Riegl VMZ (Abbildung 1) vorgestellt. Mit diesem System wurden die jeweils 8 km langen Uferlinien des Sabrodter und des Spreetaler Sees dreidimensional effizient erfasst. Darüber hinaus wird gezeigt, dass mit dem etablierten terrestrischen Laserscanning (TLS) und bildbasierten photogrammetrischen Methoden (structure-from-motion) die MLS Messung punktuell verdichtet werden können. Erarbeitet wurden die folgend dargestellten Ergebnisse in einem Gemeinschaftsprojekt des Instituts für Wasserbau und dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden sowie der LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft).

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die beiden Tagebaurestseen, Sabrodter und Spreetaler See (Tabelle 1, Abbildung 2). Rund um den Sabrodter See fanden vor und nach der Messung Verdichtungssprengungen statt, die bei der Planung und Durchführung zu berücksichtigen waren.

Tabelle 1: Dimensionen und Länge der Uferlinie der vermessenen Seen

	Breite [m]	Länge [m]	Uferlinie [m]
Sabrodter See	ca. 600	ca. 3900	ca. 8500
Spreetaler See	ca. 1600	ca. 2900	ca. 8000



Abbildung 2: Sabrodtter (links) und Spreetaler See (rechts) ©OpenStreetMap

Mehrere Abschnitte der Uferlinie beider Seen waren aufgrund der Gefahr von Hangrutschungen oder Erdabsackungen nicht zugänglich. Für die vom Boot aus erfolgte mobile Laserscanner-Messung ist lediglich eine geeignete Stelle zum Slippen notwendig. Das Betreten der Uferbereiche ist für die MLS-Messung nicht notwendig.

3 Messungsdurchführung

Das konkrete Ziel der Messungen war eine möglichst vollständige dreidimensionale Erfassung der Uferlinie der beiden vorgestellten Seen als geometrische Grundlage für Simulationsberechnungen zur Erstellung eines Wind-Wellen-Gutachtens. Wegen der sich möglicherweise noch verändernden Topographie der Seeumgebung sollten die Aufnahmen möglichst zeitnah erfolgen.

Als hauptsächliches Messverfahren wurde in Zusammenarbeit mit der Firma RIEGL Laser Measurement Systems *Riegl (2020)* ein mobiles Laserscanning (MLS) von einem Sportboot aus durchgeführt. Diese auf dem berührungslosen Laserscan-Verfahren basierende Messmethode ermöglicht die effiziente Vermessung der Uferlinie ohne diese großflächig betreten zu müssen. Vergleichbare Messungen wurde bereits in *Mohamed (2007)* und *Vaaja et al. (2013)* beschrieben.

Zur Validierung der MLS-Messung und zum Schließen von vereinzelt auftretenden Scanshatten, wurden ca. eine Woche später punktuelle Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner und einer UAV durchgeführt. Mit diesen Verfahren wurden vorher festgelegte kleinräumige und sicher zugängliche Bereiche ergänzend erfasst. Alle eingesetzten Messverfahren werden im Folgenden erklärt.

3.1 Terrestrisches Laserscanning (TLS)

Das terrestrische Laserscanning ist ein berührungsloses Messverfahren, welches es ermöglicht, die Umgebung um den auf einem Stativ aufgebauten Laserscanner in einem zunächst auf den Scanner bezogenen Koordinatensystem zu erfassen. Dabei wird ein vom Laserscanner generierter Laserimpuls über einen rotierenden Spiegel oder Prisma in den Objektraum abgelenkt und von der Objektoberfläche reflektiert (Abbildung 3). Mit Hilfe der Impuls-Laufzeit und der Lichtgeschwindigkeit wird die Distanz zwischen Scanner-Nullpunkt und Objektoberfläche berechnet. Aus Distanzwert und der Richtung des ausgesandten Laserimpulses werden die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten des Oberflächenpunktes in Bezug zum Nullpunkt des Laserscanners abgeleitet. Die so entstandenen Punktwolken mehrerer Standpunkte können anschließend in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt und mit Hilfe von GNSS-Messungen georeferenziert werden.



Abbildung 3: Grundprinzip terrestrisches Laserscanning (links) und Aufnahme des Ufers am Spreetaler See (rechts)

Mit dem hier eingesetzten Riegl VZ-400i (Abbildung 3, rechts) können so effektiv bis zu 500.000 Punkte pro Sekunde gemessen werden und in diesem Fall die Oberflächen der Uferbereiche, hochaufgelöst und geometrisch präzise aufgenommen werden. Zum gemessenen Punkt wird zusätzlich die Intensität (Signalstärke) erfasst. Diese wird intern radiometrisch kalibriert, so dass ein entfernungsunabhängiger Reflektivitätswert resultiert, welcher unter anderem zur automatischen Oberflächenklassifikation (z.B. Sand, Stein, Vegetation) genutzt werden kann. Zur Messdurchführung muss der Laserscanner auf einem Stativ aufgebaut werden (Abbildung 3) und damit das Ufer selbst auch betreten werden, was von Wasser oder Land aus oft nicht möglich ist. Zudem sind lange Uferlinien nur mit vielen Standpunkten realisierbar. Eine effiziente Vermessung einer Uferlinie mit fast 9000 m Länge ausschließlich mit diesem Verfahren ist praktisch nicht möglich.

3.2 Mobiles Laserscanning (MLS)

Das mobile Laserscanning (MLS) ist eine Erweiterung des terrestrischen Laserscannings. Dabei wird ein Laserscanner auf einer mobilen Plattform, in diesem Fall auf einem Boot montiert (Abbildung 4) und im Profilmodus betrieben. Die Auslenkung des Laserstrahls erfolgt nur in vertikaler Richtung durch den sich rotierenden Spiegel. Damit ergibt sich eine vertikale 2D-Scanebene, welche rechtwinklig zur Fahrtrichtung ausgerichtet ist. Die dritte Dimension der Punktwolke ergibt sich aus der kontinuierlichen Fortbewegung des Bootes. Die Uferbereiche werden mit konstanten Geschwindigkeit abgefahren und es wird somit die Oberfläche des Ufers kontinuierlich erfasst. Die Perspektive ermöglicht damit zumeist „unter“ die Vegetation zu schauen. Im Unterschied zum TLS-Verfahren hat jeder Messstrahl bei einer sich bewegend Plattform einen anderen Koordinatenursprung und eine andere Richtung. Deshalb muss die Orientierung der Plattform im Raum (6 Parameter) mittels eines IMU/GNSS-Systems mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung aufgenommen und jedem einzelnen Messpunkt zugeordnet werden.

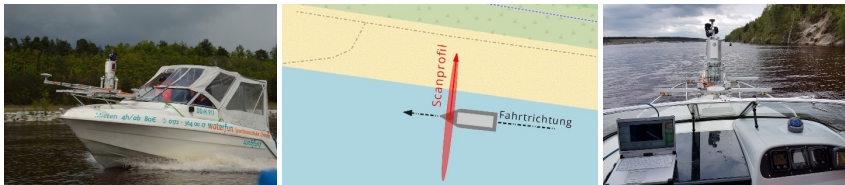


Abbildung 4: Mobiles Laserscanning mit einem Riegl VMZ

Im Detail besteht das verwendete System aus einer IMU/GNSS-Einheit mit einer absoluten Positionsgenauigkeit (in Weltkoordinaten) im bewegten Modus von 2,5 cm und einer Winkelgenauigkeit von ca. 0,01°. Mit dieser Einheit wird die Position und Orientierung des Laserscanners Riegl VZ-2000i kontinuierlich erfasst. Der Laserscanner selbst hat eine max. Reichweite von 2500 m bei einer Messrate von effektiv 21.000 Punkten pro Sekunde und einer Reflektivität der Oberfläche von 90%. Wird eine höhere Abtastgeschwindigkeit zum Erreichen einer höheren Punktauflösung an der Uferoberfläche eingestellt, reduziert sich die maximale Distanz.

Die beiden Seen wurden im konkreten Fall mit einer Messrate von 500.000 Punkten pro Sekunde aufgenommen. Abhängig von der Reflektivität der Oberfläche beträgt die Reichweite dann zwischen 300 und 600 m. Die Befahrung erfolgte in etwa mit Schrittgeschwindigkeit (6 km/h) im Abstand von 50 bis 100 m vom Ufer. Inklusive Kalibrierung des Systems dauerte die Befahrung

rung damit etwa 2 Stunden für einen der beiden Seen. Zusätzlich zu den Koordinaten aller Einzelpunkte wurden kontinuierlich Fotos mit einer fest auf dem Laserscanner montierten Kamera Nikon D810 aufgenommen. Die relative Orientierung der Kamera zum Laserscanner bleibt während der Messung stabil und wird im Rahmen der Kamerakalibrierung bestimmt. Zusammen mit einem genauen Zeitstempel je Bild wird das Einfärben der Punktwolke ermöglicht, so dass jeder Punkt der Punktwolke neben den Koordinaten X , Y und Z sowie dem Reflektivitätswert zusätzlich RGB-Werte erhält.

3.3 UAV-basierte photogrammetrische Erfassung

Structure-from-Motion (SfM) ist ein noch relativ junges und populäres Verfahren in vielen Anwendungen. Dabei werden zahlreiche sich stark überlappende Fotos aufgenommen und zu einer dreidimensionalen Punktwolke verarbeitet. Die für dieses Verfahren benötigten Bildverbände können entweder handgehalten oder mit einer mobilen Plattform als Sensorträger aufgenommen werden. Geeignete Kameraträger zur Gewässerrandvermessung sind Boote oder Multikopter/Drohnen (Unmanned aerial vehical, kurz UAV).



Abbildung 5: UAV-Befliegung mit einer dji Mavic Pro Platinum

Die mittels SfM berechneten dreidimensionalen Punktwolken sind ohne zusätzliche Messpunkte nicht georeferenziert und maßstabslos. Eine ungünstige Aufnahmekonstellation, unzureichende Bildüberlappung oder eine zu geringe Bildanzahl kann zu geometrischen Fehlern der Daten, z.B. Modelldeformationen führen. Für geometrisch präzise (cm bis mm) und zuverlässige Messdaten sind daher zahlreiche Passpunkte am aufzunehmenden Objekt (im konkreten Fall entlang des aufzunehmenden Ufers) notwendig, was wiederum nur mit konventionellen Verfahren, wie der tachymetrischen Vermessung, erfolgen kann. Die ausschließliche Nutzung dieses Verfahrens für die

Aufnahme und Auswertung mehrerer Kilometer langer Uferlinien ist als sehr zeitaufwändig einzuschätzen und nicht praktikabel.

Im Rahmen dieses Projektes wurden Teilbereiche der Uferlinien zur Verdichtung der MLS-Punktwolke mit einer kommerziellen UAV (Abbildung 5) befliegen. Die Flughöhe der händisch durchgeführten Befliegung, betrug dabei 25 – 50 m und es wurden bei einer Flugdauer von rund 10 Minuten Bildverbände mit bis zu 170 Einzelbildern aufgenommen. Die gemessenen Gebiete hatten eine Ausdehnung von maximal 200 m entlang und 100 m quer zur Uferlinie. Die Berechnung der 3D-Punktwolken erfolgte mit dem Programm Agisoft Metashape. Die Georeferenzierung der UAV-Punktwolken erfolgte über eine Einpassung in das Koordinatensystem der bereits georeferenzierten TLS-Punktwolken.

4 Ergebnisse

Das MLS-Verfahren lieferte pro See eine Punktwolke von ca. 15 Milliarden Punkten, welche in Abbildung 6 weiß dargestellt sind.

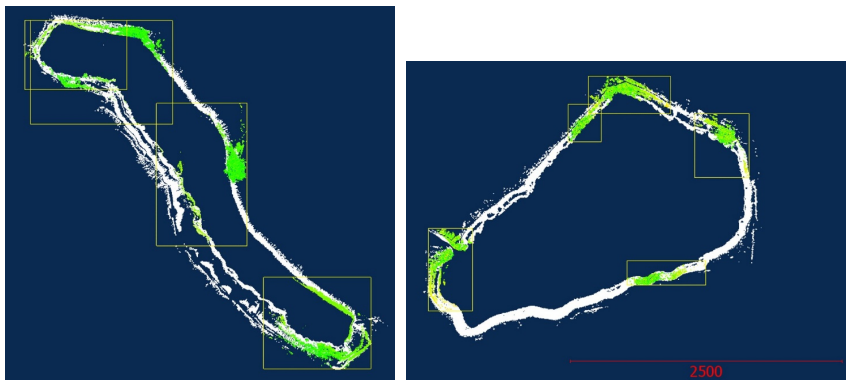


Abbildung 6: MLS-Punktwolke (weiß) und TLS- bzw. SfM-Punktwolke (grün)

Der durchschnittliche Punktabstand beträgt abhängig von der aktuellen Messdistanz zwischen 2 und 5 mm. Während die absolute Genauigkeit (Weltkoordinaten) limitiert durch die Genauigkeit der Georeferenzierung im Bereich von 5 cm liegt, ist die Relativgenauigkeit (lokales Koordinatensystem) deutlich höher. Das MLS-Verfahren lieferte zwei nahezu vollständige Punktwolken der Uferlinien beider Seen mit den Zusatzattributen Farbe (Abbildung 7, mitte) und Reflektivität (Abbildung 7, rechts).

4.1 Grenzen des mobilen Laserscannings

Vereinzelt sind in den MLS-Punktwolken Lücken im Uferbereich enthalten. Diese ergeben sich bei komplexen Ufergeometrien. Wie in Abbildung 7 (links) schematisch dargestellt, ist die Uferwand (dunkelgrüne Linie) sehr gut messbar. Das anschließende Vorland (hellgrüne Linie) liegt zu hoch und wird so von der Uferwand verdeckt. Dieser Bereich ist somit vom Boot aus nicht sichtbar und deshalb in der resultierenden Punktwolke nicht enthalten. Eine weitere Einschränkung für das MLS ist dem Ufer vorgelagerte Vegetation (z.B. Schilf). Ist diese zu dicht, kann der Laserstrahl es nicht durchdringen und es entstehen ebenfalls Scanschatten (Abbildung 7, rechts). In beiden Fällen bietet sich das terrestrische Laserscanning oder die UAV-basierte photogrammetrische Aufnahme zum Schließen der Lücken an.

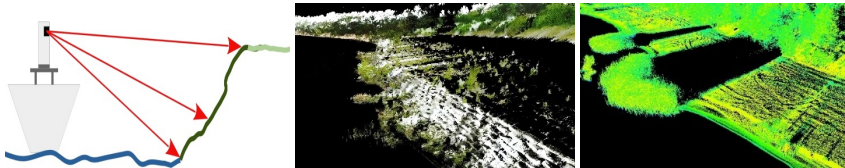


Abbildung 7: Aufnahmeprinzip MLS (links) und daraus resultierende Punktwolke der Uferlinie mit Lücken (mitte) und Lücken durch Vegetation (rechts)

Für die weitere Verwendung der MLS-Punktwolken wurden diese auf einen Punktabstand von 10 cm ausgedünnt und die Vegetation gefiltert. Diese Maßnahme bewirkt eine erhebliche Optimierung der Datenverarbeitung. Für die nachgelagerten Simulationsberechnungen wurde ein weiterer Datensatz erzeugt, welcher auf ein 1-m-Raster interpoliert und im globalen Koordinatensystem GRS80/ETRS89 in der Abbildung UTM referenziert wurde.

4.2 Vergleich der TLS- und UAV-Punktwolken

Zum Validieren der MLS-Punktwolken und zum Schließen von Lücken im MLS-Datensatz wurden 5 Bereiche mit einer Ausdehnung von ca. 300 m längs zur Uferlinie zusätzlich mit dem terrestrischen Laserscanner mit mehreren Standpunkten gescannt und mit einem UAV befliegen. Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Aufnahme eines ca. 100 × 100 m großen Bereichs. Die Georeferenzierung der Daten erfolgte über Passpunkte, die im Gelände verteilt und mittels RTK-GNSS mit einer geschätzten Genauigkeit von 2 cm eingemessen wurden.

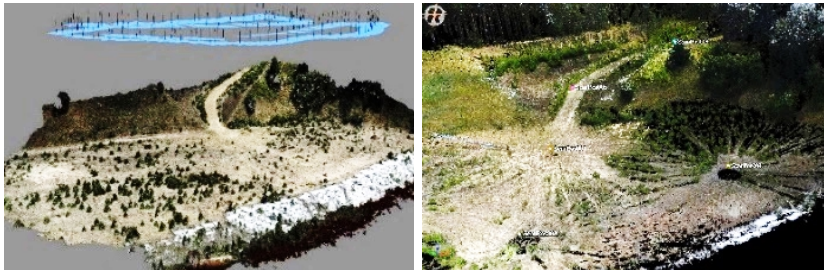


Abbildung 8: Eingefärbte Punktwolken aus UAV-SfM (links) und TLS (rechts)

Für den Vergleich dient die hochgenaue und geometrisch stabile TLS-Punktwolke als Referenz, während die UAV-Punktwolke über mindestens 4 in beiden Punktwolken gemessenen Punkten initial registriert und im Anschluss über einen Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP) feinregistriert wurde. Abbildung 9 zeigt die verbleibenden Punkt-zu-Punkt-Distanzen zwischen beiden Datensätzen.

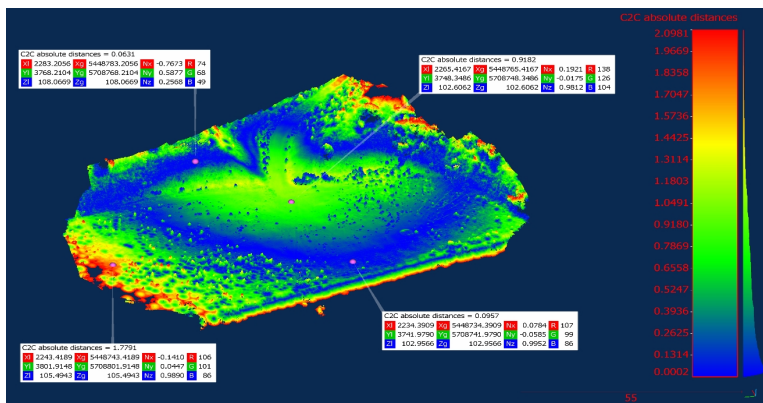


Abbildung 9: Cloud-to-cloud-Vergleich zwischen TLS- und UAV-Punktwolke

Statt zufällig verteilter Abweichungen ist an der Farbgebung eine klare Systematik erkennbar. So liegt die Abweichung des Geländes in der Mitte und am Rand bei rund 1 m (grün bis rot), dazwischen hingegen bei ca. 1 dm (blau). Die Größenordnung dieser Abweichung ist bei der Auswertung nicht vernachlässigbar und resultiert aus Modelldeformation der UAV-Punktwolke. Dieser kuppelförmige Effekt wird in der Literatur als *dome effect* bezeichnet, deren Ursache in einer ungünstigen Fehlerfortpflanzung bei Senkrechtaufnahmen liegt und nur durch eine optimierte (konvergente) Aufnahmekonfiguration oder viele Passpunkte zu beheben ist (Eltner und Schneider (2015)).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag hat eine effiziente Möglichkeit der Vermessung von Uferlinien kleiner und mittelgroßer Seen aufgezeigt. Die dabei entstandenen Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für die infrastrukturelle Planung, die topographische Überwachung oder zur Simulation verschiedener Szenarien (Überflutung, Abflussverhalten). Dafür können die erzeugten Punktwolken auf vielfältige Weise weiterverarbeitet werden. Beispielsweise können diese auf ein gleichmäßiges Raster interpoliert und durch eine Dreiecksvermaschung zu einer geschlossenen Oberfläche umgewandelt werden. Neben der reinen Visualisierung der Oberfläche für Dokumentationszwecke, die das Abgreifen diskreter Maße erlaubt, können daraus beliebige 2D-Profile der Uferbereiche erzeugt werden. Das vorgestellte MLS-Verfahren liefert hier eine hochgenaue und fast vollständige Uferrepräsentation ohne die Notwendigkeit gefährliche Uferbereiche betreten zu müssen. Zudem konnte gezeigt werden, dass mittels TLS und dem UAV-basierten photogrammetrischen Verfahren die im MLS-Scan enthaltenen Lücken geschlossen werden können.

6 Literatur

- Eltner, A., Schneider, D. (2015): Analysis of Different Methods for 3D Reconstruction of Natural Surfaces from Parallel-Axes UAV Images. *The Photogrammetric Record*, 30(151), p. 279-299.
- Mohamed, A.H. (2007): Scanning the Waters. POB – Point of Beginning. <https://www.pobonline.com/articles/91477-scanning-the-waters>
- Riegl, Laser Measurement Systems GmbH (2020): Technische Daten unter www.riegl.com
- Vaaja, M., Kukko, A., Kaartinen, H., Kurkela, M., Kasvi, E., Flener, C., Hyypä, H., Hyypä, J., Järvelä, J., Alho, P. (2013): Data Processing and Quality Evaluation of a Boat-Based Mobile Laser Scanning System. *Sensors* 2013, 13, 12497-12515; doi:10.3390/s130912497

Autoren:

Dr.-Ing Danilo Schneider
Dipl.-Ing. Robert Blaskow

Institut für Photogrammetrie und
Fernerkundung
Technische Universität Dresden
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden

Tel.: +49 351 463 33144
Fax: +49 351 463 37266
E-Mail: danilo.schneider@tu-dresden.de
robert.blaskow@tu-dresden.de

KomVISH & HydroVISH: Möglichkeiten der Verwaltung, Visualisierung und Nutzung von 3D Massendaten im digitalen Wasserbau

Frank Steinbacher
Werner Benger
Wolfgang Dobler
Ramona Baran

A4 Saal 2

Für die fortschreitende Digitalisierung im Wasserbau werden jetzt und auch in Zukunft effiziente Datenbankformate und performante Softwaretools benötigt. Dies ist sowohl durch die Komplexität der Aufgabenstellungen im Wasserbau (Unterhalt, Vermessung, Planung, Modellierung, Baumaßnahmen, Monitoring) als auch durch technologische Entwicklungen in einzelnen Bereichen wie der Vermessung bedingt. So hat sich die Airborne Laser Bathymetry, kurz ALB, in den letzten Jahren als ein state-of-the-art Verfahren in der Gewässervermessung entwickelt. Hierbei werden räumlich hochaufgelöste Daten der Gewässersohle gewonnen, allerdings reichen die auflaufenden Datenmengen allein einer Vermessung bis in die Größenordnung mehrerer Terabyte. Wird ein Fluss gemäß EU-Wasserrahmrichtlinie jetzt mehrmals vermessen multipliziert sich die auflaufende Datenmenge. Sollen jetzt solche Messdaten mit anderen Vermessungsdaten wie Echolot verknüpft werden oder mit hydraulischen Berechnungsergebnissen abgeglichen werden, dann bieten die Softwarepakete HydroVISH und das vereinfachte KomVISH flexible Lösungen zur simultanen Visualisierung und Nutzung von 3D-Messdaten und zeitabhängigen Modellierungsdaten hydraulischer Simulationen. Zudem können derlei Daten mit anderweitig verfügbaren 3D-Geodaten wie Gebäudemodellen (LoD1&2) effizient verknüpft werden. Die kombinierte Datenanalyse wird durch Nutzung eines offenen, flexiblen und dabei effizienten HDF5-basierten Datenformat ermöglicht, das im Rahmen der Datenverwaltung und -speicherung die Berücksichtigung von verschiedensten raumzeitlichen Parametern in einem vereinheitlichten Datenmodell erlaubt. Mit dem vereinfachten KomVISH besteht über implementierte Schnittstellen eine direkte Ver-

linkung in die 2D-GIS-Welt (ArcMap/ArcGIS Pro & Magellan/KomInfo) und zu verschiedenen WMS-Diensten wie OpenStreetMap oder dem BayernAtlas (2D&3D). Anhand von beispielhaften Visualisierungen zweier Projekte an der Mangfall in Bayern und der Elbe als einer der wichtigsten Wasserstraßen Deutschlands wird der digitale Mehrwert für den Wasserbau aufgezeigt.

1 Anlass und Motivation

Im Rahmen der fortschreitenden und zukünftig dringlicher werdenden Digitalisierung von Verwaltungs- und Kommunikationsprozessen gewinnen performante Datenbank- und Softwarelösungen zunehmend an Bedeutung, um damit auch Entscheidungsprozesse öffentlicher Behörden und Verwaltungen zu stützen und zu beschleunigen. Für den digitalen Wasserbau spielen aber noch weitere Aspekte eine wesentliche Rolle, denn im Rahmen z.B. von Hochwasserschutzmaßnahmen müssen Daten sowohl aus Vermessung, Planung, Unterhaltung und Modellierung oftmals zusammen geführt und im Kontext beurteilt werden. Allein die fortlaufende Entwicklung von Sensoren zur flächendeckenden 3D-Gewässervermessung führt zu hochdetaillierten und komplexen Massendaten, deren Größe inzwischen mehrere Terabyte ausmachen können. Damit steigen die Anforderungen an Hard- & Software-Module, die für die Speicherung, Verwaltung und Visualisierung der Daten benötigt werden nur unter dem Gesichtspunkt der Gewässervermessung. Zudem erfordert die Wasserrahmenrichtlinie der EU (EU, 2000) eine regelmäßige Neuvermessung der Gewässer zum Zwecke des Monitorings. Dies betrifft sowohl kommunale Behörden und Verwaltungen wie Wasserwirtschaftsämter (WWAs) in Bayern als auch staatliche Institutionen wie die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) oder die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).

KomVISH und HydroVISH sind hierbei kompakte Softwarelösungen für den Umgang mit Vermessungsdaten beispielsweise aus topo-bathymetrischen Laserscanbefliegungen (z.B. 600 km Elbe entsprechen ca. 5.5 TB an Rohdaten) oder weiteren offiziell verfügbaren 3D-Geodaten wie Gelände-, Oberflächen- und Gebäudemodellen (LoD1 & 2). Letztere dienen u.a. auch als Datengrundlage für hydraulische Modelle, wenn diese beispielsweise mehr als den durch eine topo-bathymetrische Vermessung erfassten Flussschlauch abdecken. Speziell KomVISH ist auf die Nutzung im kommunalen Umfeld zugeschnitten und erlaubt die effiziente Verknüpfung der 2D-GIS-Welt mit der

3D-Welt durch entsprechende Schnittstellen zu ArcMap und neu ArcGIS Pro sowie Magellan/KomInfo. HydroVISH hingegen bietet größeren Behörden und Verwaltungen sowie Ingenieurdienstleistern die Möglichkeit, ihre Datenprodukte in der Gesamtheit zu verwalten, zu visualisieren und zu verknüpfen. Anhand von Projektbeispielen werden simultane Visualisierungen von Vermessungs- und Modellierungsergebnissen gezeigt, z.B. topo-bathymetrische Punktwolke vs. modelliertes HQ100-Ereignis (Mangfall bei Rosenheim) oder Punktwolke aus topo-bathymetrischer und Echolot-Vermessung vs. finales Geländemodell (DGM-W Elbe/Klößen), die den digitalen Mehrwert für wasserbauliche Zwecke verdeutlichen.

2 HydroVISH und F5-Datenformat

Topo-bathymetrische Punktwolken haben einmal mehr die Anforderungen an eine sehr flexible und Datenquellen unabhängige Softwarelösung zur Datenprozessierung und -analyse erhöht. Eine Reihe weiterer Parameter muss dabei berücksichtigt werden, um die Ergebnisse automatisierter oder auch semi-automatischer Analysen der Punktwolken zu verbessern. Dazu gehören beispielsweise RGB-Werte aus Luftbildern, räumliche Informationen zu Sediment- und Bodentyp, Werte zur Trübung des Wassers während der Datenaufnahme, Wassertemperaturverteilung oder einfach nur der Wasserstand an einer Pegelstation, Wasserstände aus Hochwassersimulationen oder auch Gewässersohldaten aus Echolotungen. HydroVISH ist die einzige Softwarelösung zur Handhabung raumzeitlicher Daten unabhängig von Datenformat und Menge an Datenattributen (Benger et al., 2007).

Für die durchgehende Datenspeicherung verwendet HydroVISH ein offenes, transparentes, flexibles und dabei effizientes HDF5-basiertes Datenformat, das beim Datenmanagement die Berücksichtigung von verschiedensten raumzeitlichen Parametern in einem vereinheitlichten Datenmodell erlaubt (HDF-Group, 2018; Benger, 2004; Ritter, 2009). So können z.B., Punktwolken, Netze, Bilder und Linien in der gleichen Datei zu verschiedenen Zeitpunkten und in unterschiedlichen Koordinatensystemen abgespeichert werden. HDF5 wurde für Anwendungen im Bereich des High Performance Computing entwickelt mit effizientem und portablem I/O großer Datenmengen. HydroVISH handhabt größer-als-RAM Datenmengen via out-of-core Datenmanagement und unter Verwendung des Grafikprozessors (GPU). Nicht interaktive Batch-Anwendungen für wiederholte Prozessierungsschritte ist genauso möglich

wie die interaktive Datenanalyse bei Nutzung der graphischen Nutzeroberfläche (Abb. 1). KomVISH, der Visualisierungsableger von HydroVISH ermöglicht einen schnellen Datenzugang und eine Kopplung mit GIS-Applikationen um die Datenmengen weiter verwalten zu können (siehe Abschnitt 4).

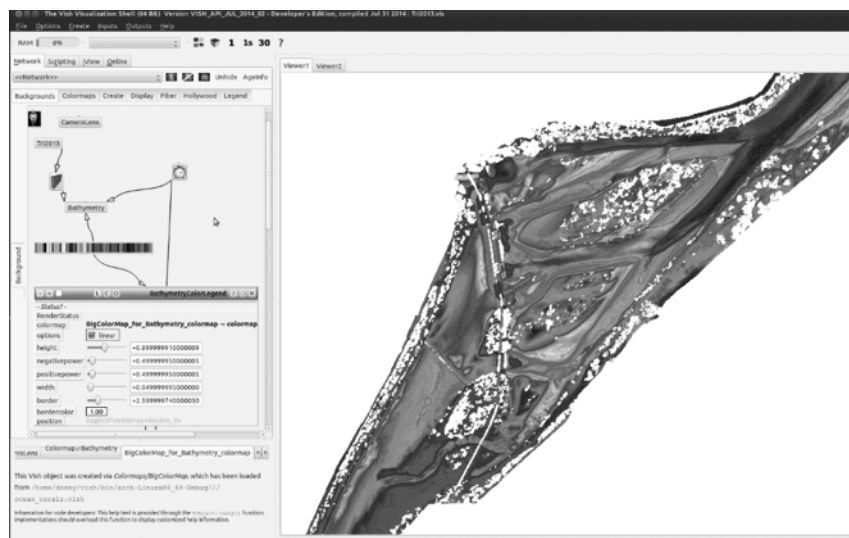


Abbildung 1: HydroVISH Nutzeroberfläche zur Erstellung von integrierten Prozessierungsabläufen in einem Netzwerk.

3 Anwendungsbeispiele: Mangfall und Elbe

In HydroVISH können komplexe wasserbau-bezogene Datensätze parallel visualisiert und damit vertieft analysiert und beurteilt werden. Dazu gehören unter anderem zu Grunde liegende Messdaten wie Punktwolken aus topobathymetrischen Befliegungen oder Echolotungen von Flussabschnitten (Abb. 2 & 4), hydraulische Berechnungsnetze aus dem Bestand einer Behörde oder eben neu erstellte Netze (Abb. 2), zeitabhängige hydraulische Berechnungsergebnisse für z.B. HQ100 an der Mangfall (Abb. 2 & 3). Dies bedeutet auch, dass man unterschiedliche Datentypen bzgl. Geometrie miteinander betrachtet, nämlich Punkte vs. Linien wie Bruchkanten vs. Flächen wie hydraulisches Dreiecksnetz (Abb. 2 & 5). Der Vorteil liegt in der Möglichkeit der ganzheitlichen Betrachtung über räumliche Skalen und den zeitlichen Verlauf eines Hochwasserereignisses hinweg. So kann einerseits die Betroffenheit

einzelner Gebäude und Grundstücke im Ereignisverlauf besser beurteilt und andererseits zum gleichen Zeitpunkt eines Hochwassers die Wirkung einzelner Schutzmaßnahmen (Überflutungsflächen in Flussauen, Deichplanung, Rückhaltebecken usw.) evaluiert werden (Abb. 3). Im Weiteren können Plausibilitätsprüfungen vorgenommen werden durch die direkte Gegenüberstellung der eigentlichen Messinformation aus einer Punktwolke egal ob aus topo-bathymetrischer Laserscanbefliegung, terrestrischer Vermessung oder Echolot, mit abgeleiteten Daten wie einem Geländemodell, Oberflächenmodell oder hydraulischem Berechnungsnetz (Abb. 4 & 5). Es können aber auch Ergebnisse verbesserter Datenauswerteverfahren wie der Full-Waveform (FWF)-Analyse zur Extraktion zusätzlicher Sohlpunkte aus ALB-Daten (Dobler et al., 2019) im Kontext anderer Datensätze bestens evaluiert werden (Abb. 4).



Abbildung 2: Visualisierung HydroAS-2d Modellierungsergebnisse (Dreiecksnetz mit weißen Linien im Flussbereich) an der Mangfall in HydroVISH zusammen mit CFD-Netz (Dreiecksnetz mit schwarzen Linien im hinteren Vorlandbereich) und ALB-Punktwolke (Vegetation).



Abbildung 3: Visualisierung zweier HydroAS-2d Modellierungsschritte (hellgrau) an der Mangfall in HydroVISH zusammen mit RGB-eingefärbten DOM zur verbesserten Beurteilung des zeitlichen Verlaufes und der räumlichen Ausbreitung eines HQ100-Ereignisses unten im rechten Bildbereich.

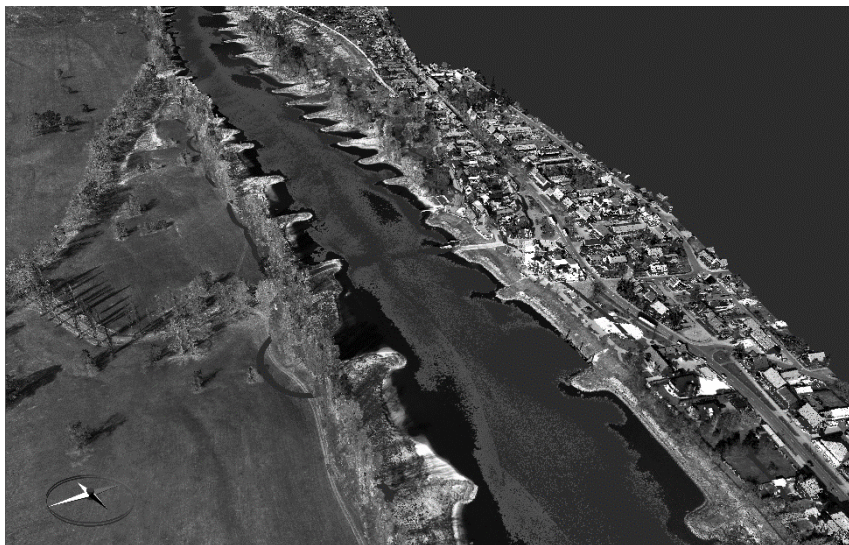


Abbildung 4: Visualisierung der RGB-eingefärbten ALB-Punkte an der Elbe (Projekt DGM-W Elbe/Klößen) in HydroVISH zusammen mit aus FWF-Analyse extrahierten zusätzlichen Sohlpunkte (hellgrau).

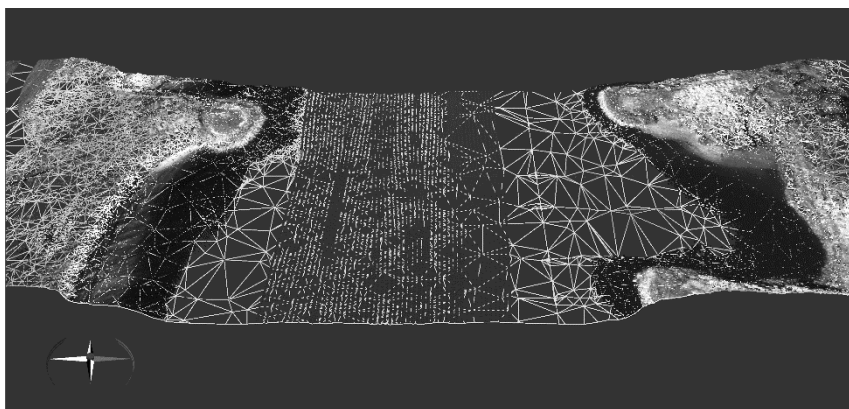


Abbildung 5: Visualisierung der RGB-eingefärbten ALB-Geländepunkte an der Elbe in HydroVISH zusammen mit Echolotdaten der Fahrrinne (Flussmitte) im Vergleich zum abgeleiteten Dreiecksnetz der Geländeoberfläche über und unter Wasser.

4 KomVISH mit GIS-Schnittstellen zur Nutzung von Geodaten

Geodaten und Informationen sind für Kommunen und Behörden über die jeweiligen Landesvermessungsämter zum Teil frei verfügbar wie in Thüringen und Nordrhein-Westfalen oder können zumeist im Zuge einer Rahmenvereinbarung wie in Bayern abgefragt werden. Dabei orientieren sich Geodaten auch immer stärker an der dritten Dimension. So besteht in Bayern über das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Zugriff auf die landesweit verfügbaren 3D-Datensätze des LoD2, DGM, DOM oder die originale Laserpunktwolke. Ohne eine entsprechende Software bleibt der Zugriff auf diese sogenannten Massendaten allerdings schwierig – vor allem deren Ansicht in Echtzeit. KomVISH als simplifizierte Version von HydroVISH ist hierbei die erste Softwarelösung zur Nutzung dieser 3D-Geodaten im kommunalen Umfeld mit der gleichzeitigen Kopplung an verschiedene GIS-Plattformen über entsprechende Schnittstellen (ArcGIS Pro und ArcMap sowie Kominfo). Dabei werden dann die 3D-Geodaten in Echtzeit parallel zu den im 2D-GIS vorliegenden Daten (z.B. DFK, Orthobilder) angezeigt und es lassen sich damit ganz einfach räumliche Bezüge herstellen. So können beispielsweise Distanzen zwischen Gebäuden, die Abmessungen von Baumkronen oder Gebäuden (Abb. 6), der Abstand zu Freileitungen, Höhenunterschiede zwischen Dächern, Lichtraumprofile von Straßen oder Brücken oder einfache interaktive geometrische Schnitte (Abb. 7) analysiert werden. Die einzelnen 3D-Daten können separat oder zusammen visualisiert und analysiert werden. Linien- und Flächenmessungen können von KomVISH aus in das gekoppelte GIS überführt werden (Abb. 8). Zusätzlich besteht eine direkte Verlinkung zu WMS-Diensten für eine verbesserte Orientierung (BayernAtlas 2D & 3D in Abb. 9, OpenStreetMap). Dies wird durch die Einbindung des HERE-Kartendienstes weiter geführt, um beispielsweise gezielt nach Straßennamen in bestimmten Ortschaften suchen zu können. Derzeit wird zudem eine Kommentarfunktion in KomVISH implementiert, um damit den Informationsfluss zwischen einzelnen Datennutzern und Bearbeitern in den Kommunen und Behörden zu verbessern. Zudem In Zukunft sollen fachspezifische Live-Daten ähnlich zur Verkehrslage in GoogleMaps direkt in die Visualisierung eingebunden werden, um beispielsweise in einer Hochwassersituation die kurzfristige Koordination und Organisation von Maßnahmen zur Deichverteidigung und -überwachung zu unterstützen.



Abbildung 6: Höhenmessung in KomVISH zur Ermittlung von Objekthöhen mit gleichzeitiger Visualisierung von RGB-eingefärbten DOM und LoD2-Gebäudedaten in dunkelgrau.



Abbildung 7: Interaktiver Profilschnitt in KomVISH mit gleichzeitiger Visualisierung der Laserpunktwolke eingefärbt nach Höhe (hellgrau bis mittelgrau) und LoD2-Gebäudedaten in dunkelgrau.

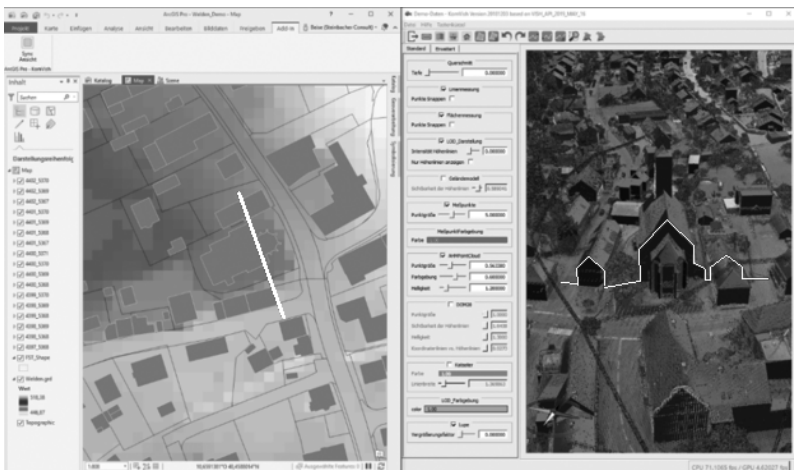


Abbildung 8: Lage einer Profillinie (weiß) in 2D (ArcGIS Pro links) und deren 3D-Geometrie (KomVISH rechts).



5 Literatur

- Benger W., (2004). Visualization of General Relativistic Tensor Fields via a Fiber Bundle Data Model. Berlin: Lehmanns Media-LOB.
- Benger W., Ritter G. & Heinzl R. (2007): The Concepts of VISH. 4th High-End Visualization Workshop; Obergurgl, Tirol, Österreich, 18.-21. Juni 2007, S. 26-39; Berlin, Lehmanns Media-LOB.de.
- Dobler, W., Steinbacher, F., Baran, R., Benger, W., Ritter, M. & Leimer, W. (2019): Die Möglichkeiten der Full Waveform für bathymetrische Airborne LiDAR Daten; Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der DGPF, Band 28, 2019, 10pp.
- HDF-Group (2018): The HDF5 Home Page, <http://www.hdfgroup.org/HDF5>
- Ritter, M. (2009). Introduction to HDF5 and F5. Baton Rouge. Retrieved from <https://www.cct.lsu.edu/cct-trs/download.php?file=CCT-TR-2009-13/CCT-TR-2009-13.pdf>
- Water Framework Directive, 2000/60/EC; Official Journal of the European Union (OJL) 327, pp. 173.

Autoren:

DI Frank Steinbacher
Dr. Werner Benger
Dr. Wolfgang Dobler
Dr. Ramona Baran

AirborneHydroMapping GmbH
Feldstr. 1b
6020 Innsbruck
Österreich

Tel.: +43 512 319070
E-Mail: info@ahm.co.at

FloRiCiMo – Hochwasserrisiko- analyse und -kommunikation auf Basis von semantischen 3D- Stadtmodellen

Torsten Heyer
Hellen Hammoudi
Rocco Zimmermann
Lars Backhaus
Jürgen Stamm
Arne Schilling
Stefan Trometer

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf der Basis von gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modellen und 3D-Stadtmodellen – FloRiCiMo“ wurde eine neue Methodik zur Analyse und Kommunikation von Hochwasserrisiko im urbanen Raum entwickelt. Diese basiert auf der Verknüpfung von semantischen 3D-Stadtmodellen mit hydrodynamisch-numerischen Solvern (2D, 3D). Innerhalb des Beitrags werden die Methodik sowie ausgewählte Ergebnisse des Forschungsprojekts anhand einer Beispielanwendung für die Stadt Dresden vorgestellt.

Stichworte: Hochwasser, Risikoanalyse, Stadtmodell, HN-Modell

1 Einführung

Auf Grundlage der EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie sind alle EU-Mitgliedsstaaten aufgefordert, das Überflutungsrisiko hochwassergefährdeter Gebiete zu analysieren und geeignete Managementpläne zu entwickeln. Darüber hinaus müssen diese Pläne in einem Turnus von 6 Jahren aktualisiert werden. Da die Analyse des Hochwasserrisikos den Einsatz von hydrodynamischen Modellen erfordert, wird der wiederkehrend hohe Modellie-

rungsaufwand offensichtlich. Dies gilt insbesondere für Analysen in urbanen Räumen, die durch eine hohes Schadenspotenzial sowie durch sehr komplexe Hochwasserschutzsysteme (dauerhafte und operationelle) charakterisiert sind. Daraus schlussfolgernd ergibt sich ein besonderer Bedarf zur Aktualisierung und Anwendung von hydrodynamischen Modellen für städtische Gebiete. Mit Blick auf die rasanten städtebaulichen Entwicklungen sind die Bedarfsintervalle für hydrodynamische Simulationen deutlich kürzer als 6 Jahre.

In einer allgemeineren Betrachtung ist die Analyse von Überflutungsprozessen nur eine von vielen Aufgaben, die im Rahmen der Stadtentwicklung beachtet werden müssen. Andere Schwerpunkte, wie z. B. die Bewältigung temporärer Krisensituationen (z. B. Evakuierungen infolge Explosionsgefahr), sind nicht minder bedeutsam. Vor diesem Hintergrund stellen semantische, digitale Stadtmodelle, die auch als „digitaler Zwilling einer Stadt“ betrachtet werden können, wichtige Werkzeuge dar, die zunehmend für urbane Planungen zum Einsatz kommen. Diese Stadtmodelle basieren oft auf dem internationalen Standard CityGML, welche eine Datenbanklösung mit zahlreichen Funktionalitäten darstellt, die weit über das einfache, statische Visualisieren einer städtischen Umgebung hinausgeht. In derartigen Stadtmodellen können umfangreiche und komplexe Daten vorgehalten, miteinander kombiniert, abgefragt und exportiert werden. In vielen Fällen sind dies auch Daten, die als Basisdaten für die Simulation physikalischer Prozesse oder für Risikoanalysen benötigt werden. Im Rahmen dieses Beitrags wird beschrieben, wie innerhalb des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekts „FloRiCoMo“ der Ansatz einer Verknüpfung digitaler Stadtmodelle mit hydronumerischen Solvern (2D, 3D) mit dem Ziel einer verbesserten Hochwasserrisikoanalyse und -kommunikation in städtischen Gebieten entwickelt und umgesetzt worden ist. Das Projekt wurde in Kooperation zwischen der Firma virtualcitySYSTEMS GmbH, Berlin und dem Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden (IWD) durchgeführt. Als assoziierte Partner waren das Umweltamt der Landeshauptstadt Dresden sowie der Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) am Projekt beteiligt.

2 Konzept und Funktionalitäten

Wesentliches Ziel des FloRiCiMo-Projekts war es, eine Methodik und einen Prozessablauf (inkl. Notwendiger Hilfsmittel und Werkzeuge) zu entwickeln, welche die Durchführung von teilautomatisierten Hochwasserrisikoanalysen gestatten (Abbildung 1).

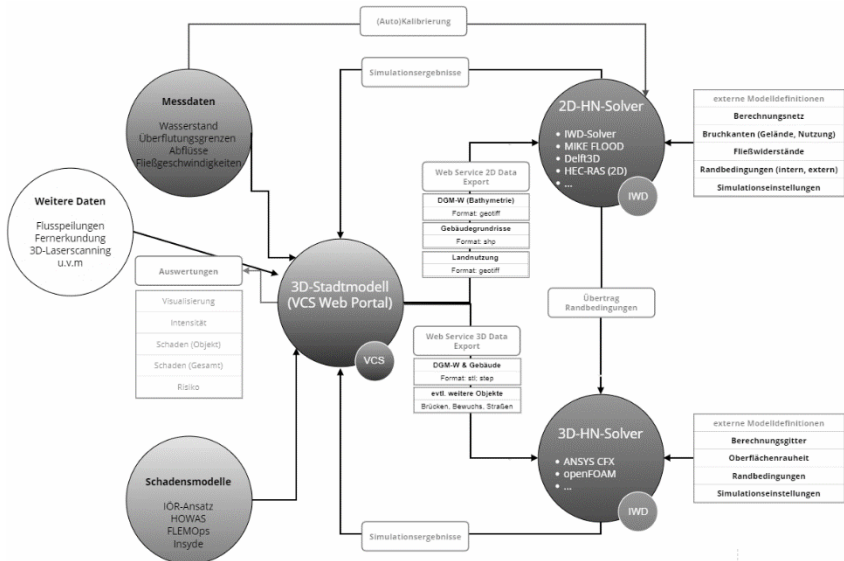


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Komponenten und des Workflows im FloRiCiMo-Ansatz

Darin stellt das „VCS Web Portal“ eine zentrale Komponente dar, welche neben der Speicherung und Administration der Stadtmodellldaten zahlreiche weitere Funktionalitäten aufweist, wie z. B.

- ◀ die (georeferenzierte) Auswahl und Abfrage,
- ◀ den Import und Export sowie
- ◀ die benutzerspezifische Aufbereitung und Darstellung

von Daten. Hinsichtlich der Simulation von Oberflächenabflussprozessen können sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Berechnungen durchgeführt werden. Mit Blick auf den Rechenaufwand können 2D-Berechnungen vorrangig für gesamte Städte oder Stadtgebiete durchgeführt

werden, während durch 3D-Simulationen die hydraulischen Charakteristiken an und in ausgewählten Objekten (z. B. einzelne Häuser oder Brücken) des Stadtmodells analysiert werden können. Darüber hinaus wurde innerhalb des Projekts eine Funktionalität entwickelt, womit die Ergebnisse einer großflächigen 2D-HN-Berechnung zu hydraulischen Randbedingungen für objektbezogene 3D-HN-Simulationen transformiert werden können. Sowohl für die 2D- als auch für die 3D-Simulationen wurden verschiedene kommerzielle und nicht-kommerzielle Solver getestet, wobei das Augenmerk nicht nur auf die Berechnungsgeschwindigkeit, sondern auch auf den zeitlichen Aufwand und die Qualität der Modellerstellung gelegt wurde.

3 Ergebnisdarstellungen und –auswertungen (Auswahl)

Hydronumerische Simulationsergebnisse

Im Gegensatz zu den heute üblichen zweidimensionalen Darstellungen hydronumerischer Simulationsergebnisse in Karten und GIS, erfolgt in FloRiCiMo eine Einbindung der 2D- und 3D-Ergebnisse in die dreidimensionale Umgebung des digitalen Stadtmodells. Die hydraulischen Parameter der 2D-HN-Berechnungen (z. B. Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit) werden dann farbcodiert oder fotorealistisch auf Höhe des berechneten Wasserspiegels dargestellt (Abbildung 2 und 3). Die fotorealistische Darstellung eines Hochwasser-szenarios besitzt den Vorteil, dass dadurch Gefahren und Risiken für Nutzer, die kein Expertenwissen auf dem Gebiet der Hydraulik besitzen, besser kommuniziert werden können, zumal der Fließvorgang animiert dargestellt werden kann. Erste Versuche, die Ergebnisse in Virtual und Augmented Reality-Umgebungen einzubinden, wurden erfolgreich unternommen und werden zukünftig am IWD weiterentwickelt. Ergebnisse, die im Rahmen von 3D-HN-Berechnungen für einzelne Objekte erhalten wurden, können ebenfalls im Web-Portal visualisiert werden. Mit dem Ziel, diese Ergebnisse vollständig zugänglich zu machen, wurde eine Slider-Funktion entwickelt. Diese erlaubt es, sich im Web-Portal in diskreten Ebenen durch den Ergebnisdatensatz zu navigieren. In den Abbildungen 4 und 5 werden beispielhaft Ergebnisse einer 3D-HN-Simulation dargestellt, die für ein Ein- und Umströmszenario eines Bürogebäudes auf Basis eines BIM-Modells erhalten wurden.

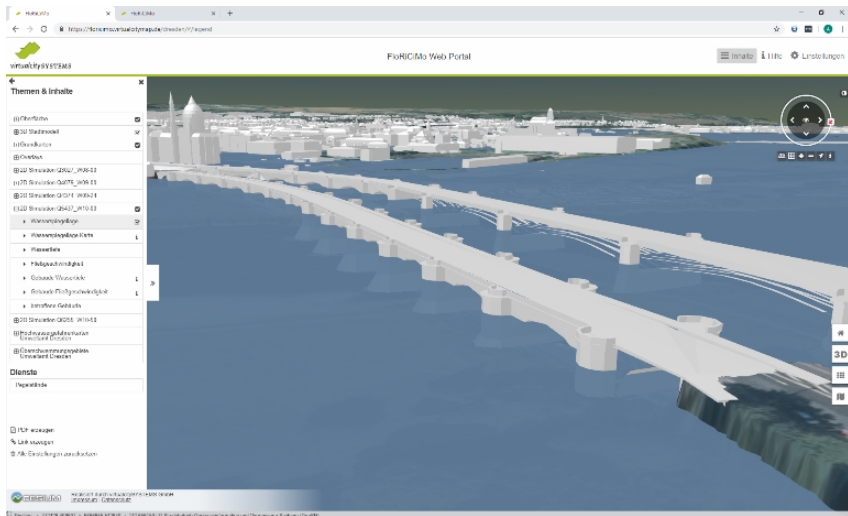


Abbildung 2: Klassische, farbcodierte Darstellung einer berechneten Wasserspiegel-lage (2D) im Web-Portal



Abbildung 3: Beispiel einer fotorealistischen Darstellung (Animation ebenfalls möglich) eines Überflutungsszenarios im Web-Portal auf Grundlage von 2D-HN-Simulationsergebnissen

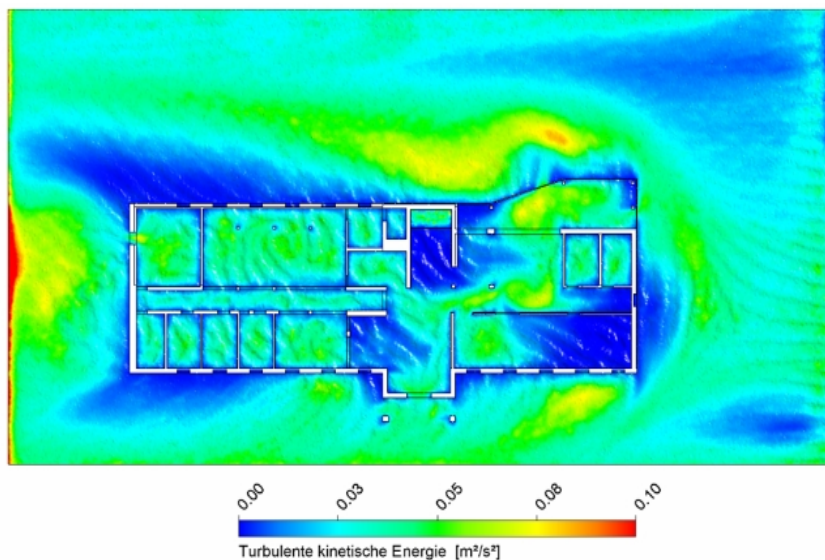


Abbildung 4: Ergebnis (turbulente, kinetische Energie) einer 3D-Simulationen der Ein- und Umströmung eines Bürogebäudes bei Hochwasser auf Basis eines BIM-Modelles



Abbildung 5: Ebenendarstellung (steuerbar über Slider-Funktion) des Ergebnisses einer 3D-HN-Berechnung für ein fiktives Bürogebäude auf Basis eines BIM-Modells

Verbesserte Hochwasser- und Schadensanalyse

Durch Überlagerung der HN-Simulationsergebnisse mit den Schadensinformationen, die im Stadtmodell objektbezogen hinterlegt werden können, ist es möglich, ereignisbezogene, direkte Schäden sowohl für Einzelobjekte als auch für gesamte Stadtgebiete im Web-Portal zu analysieren und auszuweisen (Abbildung 6 und 7). Zu diesem Zweck können im Stadtmodell z. B. gebäudespezifische Wasserstand-Schaden-Funktionen definiert und durch den Verschnitt mit lokal vorhandenen Fließtiefen ausgewertet werden. Unter Einbeziehung der Eintrittswahrscheinlichkeit des simulierten hydraulischen Ereignisses ist eine Risikoberechnung ebenfalls möglich.

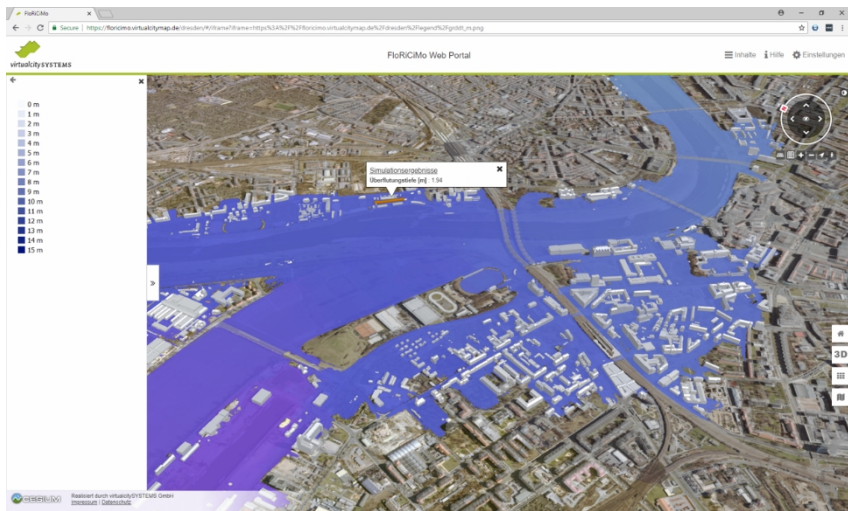


Abbildung 6: Farbcodierte Darstellung von Fließtiefen (2D-HN-Simulation) sowie Ergebnisausweisung (Durchschnittswert) einer objektbezogenen Abfrage im Web-Portal

Neben der Berechnung direkter baulicher Schäden an Gebäuden ist es ebenso denkbar, andere Schadensauswertungen, wie z. B. die Anzahl betroffener oder zu evakuierender Bürger oder auch Analysen zum Stabilitätsverhalten von Personen oder Gegenständen (z. B. Autos), die einer Strömung ausgesetzt sind, durchzuführen.

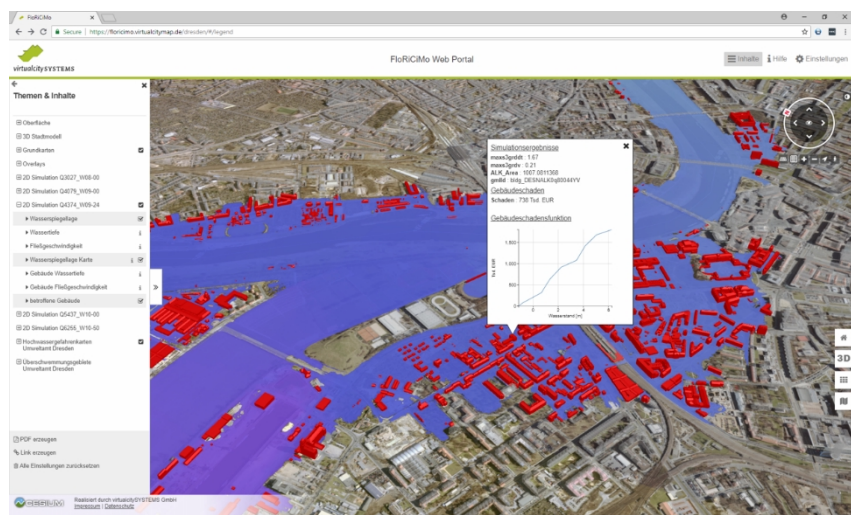


Abbildung 7: Kennzeichnung vom Hochwasser betroffener Gebäude und Darstellung eines Abfrageergebnisses (lokale Fließtiefe und –geschwindigkeit sowie direkter, baulicher Schaden) für ein Objekt

4 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Forschungsprojekts FloRiCiMo wurde ein neuer Ansatz zur Hochwasserrisikoanalyse in urbanen Räumen, der auf der direkten Verknüpfung von semantischen 3D Stadtmodellen mit hydronumerischen Modellen basiert, entwickelt. Die Methodik und Werkzeuge, die im Projekt erarbeitet wurden, wurden im Rahmen einer Pilotanwendung für die sächsische Landeshauptstadt Dresden getestet. Es konnte nachgewiesen werden, dass der FloRiCiMo-Ansatz beste Voraussetzungen für ein verbessertes Hochwasserrisikomanagement bietet und deshalb verstärkt in der Praxis umgesetzt werden sollte. Dies gilt auch vor dem Hintergrund, dass neben der Hochwasserbetrachtung auch zahlreiche weitere Anwendungen mit dem 3D-Stadtmodell verknüpft werden können, z. B. Untersuchungen zu Auswirkungen extremer Trockenheit auf das Stadtklima oder auf die Habitataignung kleinerer städtischer Gewässer. Mit Blick auf die rasante Entwicklung im „Building Information Modeling (BIM)“ sowie auf weitere Vorhaben zur Digitalisierung im Bereich des Bauingenieurwesens wird ein besonderes Entwicklungspotenzial für diesen Ansatz gesehen, da mehr und detailliertere Informationen bezüglich

der Einwirkungen (Prognosen oder Echtzeit-Messungen) und der Schadenspotenziale (detaillierte Informationen zu baulichen Komponenten oder auch zur Nutzung eines Bauwerks) vorgehalten und miteinander verknüpft werden können.

5 Danksagung

Das Forschungsprojekt FloRiCiMo wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützt und finanziert. Die sächsische Landeshauptstadt Dresden, speziell das Umweltamt und das Amt für Geodaten und Kataster, sowie der Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) haben maßgeblich zum Projekt beigetragen, indem sie Daten bereitgestellt sowie praktische Erfahrungen und Ideen eingebracht haben. Dadurch konnten die praxisrelevanten Ziele und Anforderungen des Projekts bzw. der Methodik identifiziert und überprüft werden.

Autoren:

Dr.-Ing. Torsten Heyer
Dipl.-Ing. Hellen Hammoudi
Dipl.-Ing. Rocco Zimmermann
B.Sc. Lars Backhaus
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Dr.-Ing. Arne Schilling
Dr.-Ing. Stefan Trometer

Institut für Wasserbau und Technische
Hydromechanik (IWD)
Technische Universität Dresden
August-Bebel-Bebel-Straße 30
01062 Dresden

virtualcitySYSTEMS GmbH
Tauentzienstraße 7 b/c
10789 Berlin

Tel.: +49 351 463 34397
Fax: +49 351 37120
E-Mail: wasserbau@tu-dresden.de

Tel.: +49-(0)30-8904871-10
Fax: +49-(0)30-8904871-19
E-Mail: aschilling@virtualcitysystems.de
strometer@virtualcitysystems.de

Hydrographische Maßnahmen für eine smart-BWaStr

Thomas Artz
Dieter Willersinn

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mit der Erstellung einer Maßnahmenplanung zum (Teil-)Autonomen Messen beauftragt; das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) ist im Unterauftrag eingebunden. Exemplarisch für verschiedene Messprozesse der quantitativen Gewässerkunde werden konkrete Beispiele an Hand der Hydrographie präsentiert und es werden mögliche Perspektiven für die Bereitstellung aktueller Tiefeninformationen über einen individualisierbaren, zentralen Zugangspunkt (smart-BWaStr) dargestellt.

Stichworte: Hydrographie, Autonomie, Automatisierung, Maßnahmenplanung, smart-BWaStr

1 Einleitung / Hintergrund

Um den digitalen Wandel im Kontext der Bundeswassersstraßen (BWaStr) voranzutreiben, hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) am 14.5.2019 den Masterplan Binnenschifffahrt vorgestellt (BMVI 2019), der am 4.7.2019 durch den Aktionsplan Niedrigwasser Rhein (BMVI 2019a) ergänzt wurde.

Der Aktionsplan fordert unter anderem eine verbesserte Wasserstandsvorhersage sowie die Bereitstellung aktueller Tiefeninformationen für eine verbesserte Befahrbarkeitsprognose, deren Notwendigkeit durch das Rheinniedrigwasser im Jahr 2018 zutage getreten ist.

Um die Forderungen des Aktionsplans zu erfüllen, werden hoch aktuelle Messergebnisse sowie Modelle für die Darstellung aktueller Simulation zukünftiger dynamischer Prozesse der Gewässersohle und von Strömungsprozessen benötigt. Diese sollen bedarfsgerecht in einer multifunktionalen digitalen BWaStr-Repräsentation gemeinsam mit Wasserstraßen- und Verkehrs- sowie Bauwerksinformationen über einen individualisierbaren, zentralen Zugangspunkt bereitgestellt werden, als Beitrag zu einer smart-BWaStr oder einem digitalen BWaStr-Zwilling.

Die Aktionsplan-Ziele bedeuten für eine Vielzahl an Messverfahren einen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Weiternutzung der Produkte sowie deren raumzeitliche Auflösung; aktuell verfügbare Messkapazitäten, insbesondere in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), sind zur Zielerreichung nicht in ausreichendem Maße vorhanden.

Aus diesem Grund wurde die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) damit beauftragt, einen Maßnahmenplan auszuarbeiten, das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) ist im Unterauftrag eingebunden. Die im Projekt auszuarbeitenden Maßnahmen sollen den Automatisierungsgrad des behördlichen Messprozesses soweit erhöhen, dass die WSV den Paradigmenwechsel ohne eine massive Aufstockung der Personalressourcen bewältigen kann.

Das Projekt wird in Abschnitt 2 vorgestellt, Abschnitt 3 enthält eine Bestandsaufnahme des aktuellen Messprozesses. Abschnitt 4 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Das Projekt Maßnahmenplanung (Teil-)Autonomes Messen

2.1 Komponenten des Messprozesses

Für die Ermittlung von Maßnahmen werden die aktuellen Messprozesse der quantitativen Gewässerkunde analysiert und hinsichtlich ihres Automatisierungspotentials bewertet. Dabei wird der Begriff „Messen“ als Synonym für die gesamten Mess- und Modellierungsprozesse verwendet, da für die Realisierung der Vision (teil-) autonomer, fernsteuerbarer Messplattformen zur Laufendhaltung der smart-BWaStr eine integrierte Betrachtung von Messplanung, Messausführung und Messwertprozessierung sowie die Erstellung von Produkten der quantitativen Gewässerkunde, (hydronumerischen) Modellen und Prognosen zwingend erforderlich ist (vgl. Abbildung 1). Demnach werden folgende digitale Parameter bzw. Produkte, basierend auf aktuellen – und ggf. modellierten / vorhergesagten – quantitativen gewässerkundlichen Messdaten sowie vorhergesagten Daten betrachtet:

- Wasserstände und Wassertiefen (aktuell, vorhergesagt),
- Fließgeschwindigkeiten und -richtungen (Strömungen) (aktuell, vorhergesagt),
- morphodynamische Sohlprozesse (Geschiebetransport, Sedimentverlagerungen) (aktuell, vorhergesagt),

- Gelände- und Gewässersohltopographien und deren Veränderungen (aktuell),
- Verkehrsaufkommen (aktuell).

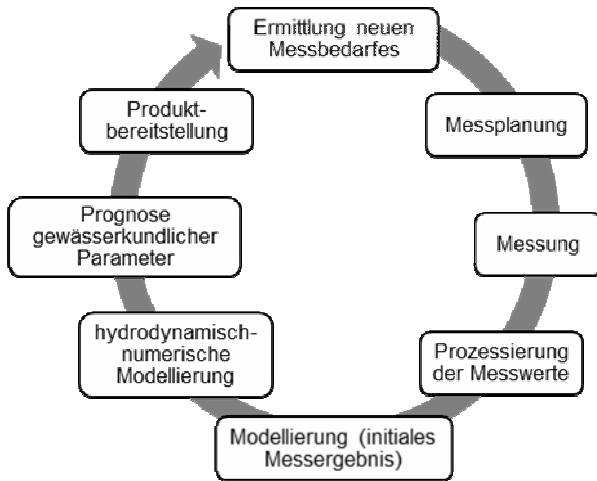


Abbildung 1: Schematischer Gesamt-Messprozess, für den Maßnahmen definiert werden sollen, die einen vollständig digitalen, automatisierten Ablauf ermöglichen. Die Qualitätssicherung ist hiervon explizit ausgenommen, da diese weiterhin einen hohen Grad an manueller Bearbeitung beinhalten soll.

2.2 Ziele der Maßnahmenplanung

Die Maßnahmenplanung zielt auf die Erhöhung des Automatisierungsgrades der Messprozesse ab. Dies bedeutet keine Einschränkungen für die Messplattformen. Dementsprechend sollen die Maßnahmen sowohl für manuell betriebene als auch autonome Messplattformen – die sich zukünftig im Zusammenspiel mit dem autonomen Fahren und der Entwicklung einer digitalen Infrastruktur ergeben werden – anwendbar sein. In diesem Kontext sollen

- kurzfristige praktisch wirksame konkrete Maßnahmen,
- Konzepte für mittel- und langfristige Maßnahmen,
- Konzepte für koordinierte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit potentiellen Beteiligten,
- Zeitplanung und Priorisierung sowie
- grobe Kostenschätzungen

erfolgen, um die in Masterplan sowie im Aktionsplan definierten Ziele im Hinblick auf die Messprozesse unter Berücksichtigung autonomer Prozesse zu analysieren und zu dokumentieren.

Damit wird der Maßnahmenplan einen Rahmen für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bereitstellen, auf Grund derer digitale Prozesse, z.B. bei der Schiffsführung oder wasserbaulichen Managementaufgaben, bedarfsgerecht ermöglicht werden.

3 Bestandsaufnahme des aktuellen Messprozesses

Exemplarisch für die zuvor dargestellten Messverfahren der quantitativen Gewässerkunde wird die Bestandsaufnahme für die Hydrographie dargestellt. Die Hydrographie ist nach Schiller (2012) ein wissenschaftlicher Aufgabenbereich mit weitgefächerten Anwendungen. Aus diesem wird hier nur der Kernbereich der Gewässervermessung betrachtet, bei dem die Gewässersohltopographie oder aber auch die Unterwassergeometrie von Wasserbauwerken ermittelt wird. Als weitere Einschränkung werden nur Fächerecholotmessungen berücksichtigt.

Damit aus diesen Fächerecholotmessungen anforderungsgerecht aktuelle Informationen bereitgestellt werden können sind quasi-kontinuierliche Messungen notwendig. Dies geht mit einem hohen Mess- und Auswerteaufwand einher, der nur realistisch zu erfüllen ist, falls ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden kann. Für hochgradig automatisierte bis hin zu autonomen Messungen sind neuartige Messplattformen sowie weitere Innovationen aus dem autonomen Fahren (z.B. Komianos 2018) unabdingbar. Diese sind nicht Bestandteil der Maßnahmenplanung, stattdessen wird der Fokus auf die Mess- und Auswerteprozesse gelegt, bei denen die Messplattformen weiterhin manuell betrieben werden können. In weiteren Phasen der Entwicklung werden autonomes Fahren und autonomes Messen voraussichtlich iterativ integriert.

3.1 Prozesskette der Gewässervermessung

Die bei einer hydrographischen Vermessung erfassten Messwerte sind zunächst eine Vielzahl an Einzelmessungen eines Multisensorsystems (vgl. Brüggemann u.a. 2018). Diese werden häufig noch an Bord mittels einer Erfassungssoftware zu den 3D-Koordinaten der Gewässerbodenpunkte fusioniert. Dieser Prozessschritt erfolgt heute bereits vollautomatisch. Dennoch sind im gesamten Messprozess eine Vielzahl manueller Eingriffe und

Entscheidungen notwendig. Der Ablauf einer Gewässervermessung kann wie folgt skizziert werden:

1. Sensoren – in Abhängigkeit der Revierkenntnis und aktueller Rahmenbedingungen – konfigurieren,
2. Sensoren durch gezielte Testmessungen überprüfen,
3. Wasserschallgeschwindigkeitsprofile manuell ermitteln (min. vor und nach der Messdatenerfassung),
4. Messdaten erfassen, dabei während der Erfassung (visuell) auf Plausibilität und Vollständigkeit prüfen,
5. Messwerte semi-automatisch plausibilisieren,
 - a. Ortungs- und Positionierungssensoren, Wasserschallgeschwindigkeitsprofile,
 - b. automatische Reprozessierung der Gewässerbodenpunkte,
 - c. Plausibilisierung der Gewässerbodenpunkte,
6. Modellierung/Approximation parametrischer Funktionen zur Ableitung eines digitalen Geländemodells,
7. Planung einer neuen Messung.

Darüber hinaus erfolgt eine Vielzahl an Dokumentationen zur Qualitätssicherung des Messprozesses von der Einstellung des Messsystems bis hin zur Wahl der Prozessierungsparameter.

3.2 Aktuelle Defizite und Automatisierungspotentiale

Bei dem zuvor dargestellten Prozess entsteht ein relativ hoher manueller Aufwand bei der Inbetriebnahme des Messsystems mit der Notwendigkeit von Expertenwissen zur Beurteilung der auftretenden Messabweichungen und Messsignalcharakteristika. Während der Messung müssen Messunterbrechungen bei „äußeren“ Einflüssen fachgerecht behandelt werden. So können z.B. Ausfälle der Satellitenortung zu Datenlücken führen. In einem automatischen Betrieb muss auf diese Störungen zeitnah reagiert werden. In gewissem Maße kann dies durch die Nutzung inertialer Navigationssysteme erfolgen. Insbesondere sind dazu Ansätze entwickelt worden, die Aspekte der Qualitätssicherung in der Sensorfusion berücksichtigen (z.B. Artz u.a. 2016). Diese Algorithmen müssen für einen hochautomatisierten Messprozess weiterentwickelt werden, um eine zuverlässige und robuste Georeferenzierung der Echolotmessungen zu gewährleisten.

Nachdem die Messdaten zu Gewässerbodenpunkten fusioniert wurden beginnt die eigentliche Auswertung der Messung. Das Verhältnis von Erfassung zu Auswertung liegt bei ca. 1:1 bis 1:2 insbesondere, da die Plausibilisierung einen hohen manuellen Aufwand beinhaltet.

Die Plausibilisierung der Sensorzeitreihen erfolgt i.A. visuell. Zur Automatisierung sind Werkzeuge der Zeitreihenanalyse vorstellbar, um die Messreihen zu filtern und somit zu plausibilisieren. Dies kann von der Komplexität her bis zur Fusionierung der Sensoren in Form einer Kalman-Filterung zur optimierten Positions- und Orientierungsbestimmung im Postprocessing – wie im Projekt HydrOs (z.B. Artz u.a. 2016) prototypisch umgesetzt – erfolgen.

Darüber hinaus ist in Abhängigkeit vom Messgebiet und der Messaufgabe ein hoher manueller Aufwand bei der Plausibilisierung der Gewässerbodenpunkte notwendig. Derzeit werden in der WSV flächenhafte Verfahren eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.3). Diese Verfahren sind (semi-)automatisch einsetzbar, versagen jedoch bei speziellen Ausprägungen des Gewässerbodens.

Bei der Modellierung in Form der Approximation von parametrischen Funktionen an die Messdaten zur Ableitung eines GRID sind Entscheidungen bei der Wahl der Modellierungsparameter in Abhängigkeit der Gewässerbodenstruktur und Rauheit durch den Auswerter zu treffen. Abschließend ist die Konsistenz des Produktes zu beurteilen.

3.3 Plausibilisierung von Gewässerbodenpunkten

Für eine flächenhafte Plausibilisierung wird der Gewässeruntergrund mathematisch durch eine stetige Fläche im dreidimensional kartesischen Raum beschrieben. Die Form des Gewässeruntergrundes wird dazu durch ganze rationale Polynome als Funktion der Ost- (E) und Nordwerte (N) der Gewässerbodenpunkte

$$z = \varphi(E, N) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J a_i E_i \cdot b_j N^j$$

mit den Polynomparameter a und b approximiert. In der Hydrographie kann der Anteil von Ausreißern im Datenmaterial örtlich begrenzt (z.B. durch Schraubenwasser oder Bewuchs) sehr hoch sein. Durch diese ungünstige Verteilung versagen die herkömmlichen Parameterschätzungen und Ausreißertests. Um Abweichungen dennoch sicher aufdecken zu können, ist der Einsatz der robusten Parameterschätzung in Form eines L1-Norm Schätzers geboten. Im Unterschied zur Methode der kleinsten Quadrate (L2-Norm Schätzer, z.B. Koch 1996), wird hier die gewichtete Summe der absoluten Verbesserungen v minimiert. Daher ergibt sich

$$p^T |v| = \sum_{i=1}^n p_i |v_i| \rightarrow \min.$$

Dieses Problem lässt sich u.a. mittels iterativer Gewichtsanzpassung im Berechnungsablauf der Methode der kleinsten Quadrate

$$(A^T P_A A) x = A^T P_A l$$

$$A = \frac{\partial \varphi(E, N)}{\partial x}$$

zur Schätzung der Polynomparameter $x = [a_0, \dots, a_l, b_0, \dots, b_l]$ lösen, indem in jeder Iteration k die Gewichtsmatrix P neu definiert (Neitzel 2004, S.57; Schlossmacher 1973) wird. Anschließend wird mit Hilfe der studentisierten Residuen

$$t_i = \frac{v_i}{s_0 \sqrt{p_i}}$$

für jede Beobachtung eine Testgröße in Abhängigkeit des aposteriori Varianzfaktors

$$s_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u}, \quad u = l + r + 2, n = \text{Anzahl der Messungen}$$

und der Redundanzanteile r berechnet und mit einem Signifikanzniveau von 95% die Hypothese getestet, ob eine Beobachtung einen Ausreißer darstellt (Koch u. Yang. 1998). Die Ausreißersuche wird iterativ so lange durchgeführt, bis keine weiteren Ausreißer mehr erkannt werden.

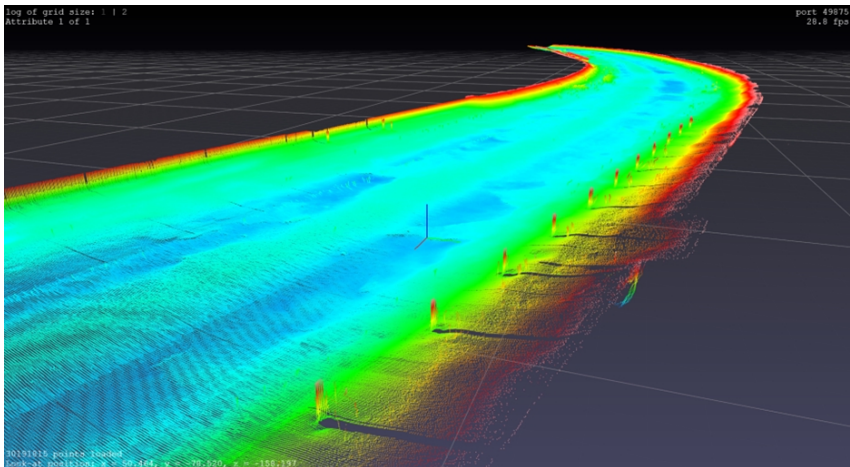


Abbildung 2: Unplausibilisierte 3D-Punktwolke einer Gewässervermessung mit Spundwänden und Dalben sowie deutlich erkennbaren Fehlmessungen im Böschungsbereich.

Dieses Verfahren ist häufig erfolgreich. Probleme treten jedoch weiterhin auf, wenn hohe Variationen im Gewässergrund – z.B. durch Böschungen – oder wasserbauliche Strukturen (Spundwände, Dalben, etc.) existieren (siehe Abbildung 2).

In diesen Fällen sind einzelne Messwerte oder Gruppen von Messwerten manuell zu deaktivieren oder solche, die durch eine vorherige automatische Plausibilisierung fälschlicherweise deaktiviert wurden wieder zu aktivieren. Für diese Fälle sind zukünftig

- neue mathematisch-statistische Ansätze des Plausibilisierungsverfahrens zu entwickeln oder

intelligente Systeme, die die derzeitig manuellen Tätigkeiten abbilden.

3.4 Potentielle Beiträge zu einer smart-BWaStr

Die Hydrographie ist ein wesentlicher Fachbereich zur Erfassung von Parametern der BWaStr und deren digitaler Bereitstellung in einer smart-BWaStr. Dabei werden insbesondere Informationen zu der Gewässersohltopographie der Fahrrinne und des Fahrwassers aber auch der Wasserwechselzonen sowie Geometrien von wasserbaulicher Strukturen bereitgestellt. Neben der Gewässersohltopographie werden weitere Parameter, wie z.B. Wasserspiegellagen bei bestimmten Abflüssen durch die Hydrographie geliefert.

Eine isolierte Betrachtung der hydrographischen Produkte zur anforderungsgerechten Bereitstellung von Tiefeninformationen der BWaStr kann in diesem Zusammenhang nicht zielführend sein. Sowohl für die Nutzung im Kontext der autonomen Schifffahrt als auch für wasserbauliche Maßnahmen sollten die Ergebnisse anderer Fachdisziplinen der quantitativen Gewässerkunde – wie bspw. Strömungen oder morphologische Parameter – behandelt und bereitgestellt werden. Nur so kann eine Beurteilung von Veränderungen in einem integrierten Zusammenhang erfolgen und ein besseres Systemverständnis erreicht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die im Auftrag des BMVI zu erstellende Maßnahmenplanung zum (Teil-)autonomen Messen im Kontext einer probabilistischen Befahrbarkeitsprognose mit ihren Konzepten und Zielen dargestellt. Exemplarisch wurden die Prozesse der Gewässervermessung beleuchtet, um deren Defizite zu detektieren und Automatisierungspotenziale zu be-

werten, sowie deren Beitrag zu einer smart-BWaStr – als anforderungsge-
recht nutzbare Realisierung einer digitalen BWaStr – zu definieren.

Insbesondere zeigt der detailliert dargestellte Prozess der flächenhaften
Plausibilisierung, dass bereits heute eine weitgehend automatische Mess-
datenverarbeitung möglich ist. Für Ausnahmefälle, in denen diese Verfah-
ren fehlschlagen, bieten sich die Möglichkeiten, mathematisch-statistische
Verfahren weiterzuentwickeln, um diese Defizite zu beheben. Vergleichbare
Optimierungspotentiale zeigen sich in der gesamten Prozessierungskette,
aus denen sich signifikante Forschungs- und Entwicklungsnotwendigkeiten
ableiten lassen. Diese werden final in der Maßnahmenplanung für vielfälti-
ge Prozesse der quantitativen Gewässerkunde dokumentiert, so dass zu-
künftig eine smart BWaStr zur Erfüllung der Anforderungen aus autono-
mem Fahren, autonomem Messen und digitaler Infrastruktur Realität wer-
den kann.

Was die Anforderungen des autonomen Fahrens betrifft, so besteht das
Dilemma, dass diese Anforderungen erst dann zutreffend formuliert wer-
den können, wenn es Praxiserfahrung mit autonomen Binnenwasserfahr-
zeugen gibt, also erst nach deren Einführung (die mit dem Maßnahmenplan
aber vorbereitet werden soll). Um dieses Dilemma zu lösen, müssen Ar-
beitshypothesen erarbeitet werden, um mit der Spezifikation des Gesamt-
systems (in unserem Fall ist das der automatisierte Messprozess und die
smart-BWaStr) voranzukommen.

Ausgangspunkt ist dabei die Beobachtung, dass menschliche Schiffsführer
erfolgreich navigieren, ohne dass ihnen mathematische Modelle, beispiels-
weise von Strömungen, vorliegen. Die erfolgreiche Navigation beruht auf
Erfahrungswissen, welches sie bei der Ausführung von Manövern berück-
sichtigen. Außerdem werden aktuelle Daten der WSV – oder ggf. zusätzliche
Systeme – durch die Schiffsführer beurteilt, um die manuelle Navigation
durchzuführen und von den Partikulieren für die Abladungsplanung ver-
wendet. Diese Erfahrungen werden zur Bewertung der aktuellen Datenlage
und zukünftiger Bedarfe herangezogen werden.

5 Literatur

Artz, Th., Scheider, A., Breitenfeld, M., Schwieger, V., Wirth, H. (2016), „Improved
positioning of surveying vessels on inland waterways with HydroS“, In:
HN 105, S. 34-38, 2016.

- BMVI (2019), Masterplan Binnenschifffahrt, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/masterplan-binnenschifffahrt.pdf?__blob=publicationFile, Berlin 2019.
- BMVI (2019a), Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“ für zuverlässigen Transport, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/WS/gemeinsame-erklaerung-acht-punkte-plan-niedrigwasser-rhein.html>, Berlin 2019.
- Brüggemann, Th, Artz, Th, Weiß, R. (2018), Kalibrierung von Multisensorsystemen. In: Beiträge zum 170. DVW-Seminar und 32. Hydrographentag vom 12. bis 14. Juni 2018 in Lindau, DVW Schriftenreihe, Band 91, S. 29-46, Wißner Verlag, Augsburg 2018.
- Koch, K. R. (1996): Robuste Parameterschätzung, AVN Heft 1/1996, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1996..
- Koch, K. R., Yang, Y (1998): Konfidenzbereiche und Hypothesentests für robuste Parameterschätzungen, ZfV Heft 1/1998, Wittwer Verlag, Stuttgart, 1998
- Komianos, A. (2018), The Autonomous Shipping Era. Operational, Regulatory, and Quality Challenges, TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12, doi:10.12716/1001.12.02.15., 2018.
- Neitzel, F. (2004): Identifizierung konsistenter Datengruppen am Beispiel der Kongruenzuntersuchung geodätischer Netze. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Berlin, 2004.
- Schiller, L. (2012): Die Identität der Hydrographen, In: HN 92, S. 6-9, Rostock, 2012.
- Schlossmacher, E. J. (1973): An Iterative Technique for Absolute Deviations Curve Fitting. Journal of the American Statistical Association, 68(344):857-859, 1973.

Autoren:

Dr.-Ing. Thomas Artz

Dr. Dieter Willersinn

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB)
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe

Tel.: +49 261 1306 5985
Fax: +49 261 1306 5088
E-Mail: artz@bafg.de

Tel.: +49 721 6091 387
Fax: +49 721 6091 233
E-Mail: dieter.willersinn@iosb.fraunhofer.de

Mit Envision® zur nachhaltigen Infrastrukturentwicklung

Nina Kumbruck und Tobias R. Möller

Nachhaltige Entwicklung ist eine multi-dimensionale Aufgabe. Große Herausforderungen wie die Klimanotlage, der dramatische Biodiversitätsverlust und die zunehmende Phosphorbelastung müssen proaktiv angegangen werden. Möglichkeiten, die Nachhaltigkeitsleistung von Infrastrukturvorhaben im Wasserbau proaktiv zu erhöhen, bietet Envision, ein bewertungsorientierter Leitfaden für nachhaltige Infrastrukturen. Envision geht über umweltrechtliche Vorgaben hinaus und berücksichtigt explizit die sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Dimensionen in einem integrativen Ansatz. Im Ergebnis entstehen nachhaltigere Projekte durch bessere Kommunikation und Zusammenarbeit mit diversen Anspruchsgruppen, die gemeinsam Entscheidungen zu konkreten Nachhaltigkeitsaspekten treffen können. Envision kann auch den Prozess des Wandels fördern sowie Ideen und Kapazitäten für zukunftsgerichtete Projekte generieren.

Stichworte: Envision, Nachhaltigkeit, Infrastruktur,
Leitfaden, Bewertung, Auszeichnung

1 Nachhaltigkeit und Infrastruktur

1.1 Herausforderungen

Nachhaltigkeit ist in der Gesellschaft angekommen. Bis dato haben sich 66 Städte in Deutschland, das Bundesland Berlin sowie das Europäische Parlament zur Klimanotlage bekannt. Im Herbst 2019 haben 1,4 Millionen Bürger*innen in Deutschland für eine klimagerechte Zukunft demonstriert.

Der Globale Klima-Risiko-Index 2020 gibt ihren Forderungen Substanz. Im Jahr 2018 war Deutschland eines der Länder, die am stärksten von Extremwetterereignissen betroffenen waren. Die Temperaturen in Deutschland lagen im Sommer 2,9°C über dem Durchschnitt. Die damit verbundenen Hitzewellen kosteten mehr als 1.000 Menschen das Leben. 70 % der Böden

waren völlig vertrocknet, was Schäden durch Ernterückgänge i. H. v. drei Mrd. EUR verursachte. (Eckert et al. 2019)

Die Klimanotlage ist nicht die einzige Herausforderung für die Erde und ihre Bewohner. Drei weitere planetare Belastungsgrenzen sind durch menschliche Aktivitäten im kritischen Zustand. Planetare Grenzen gehören zu den wesentlichen Vorraussetzungen, um stabile Lebensgrundlagen für uns Menschen zu liefern. Der Verlust von Biodiversität, die zunehmende Phosphorbelastung sowie die anhaltende Flächenumwandlung sind erst zu nehmende Probleme. (Steffen et al. 2015)

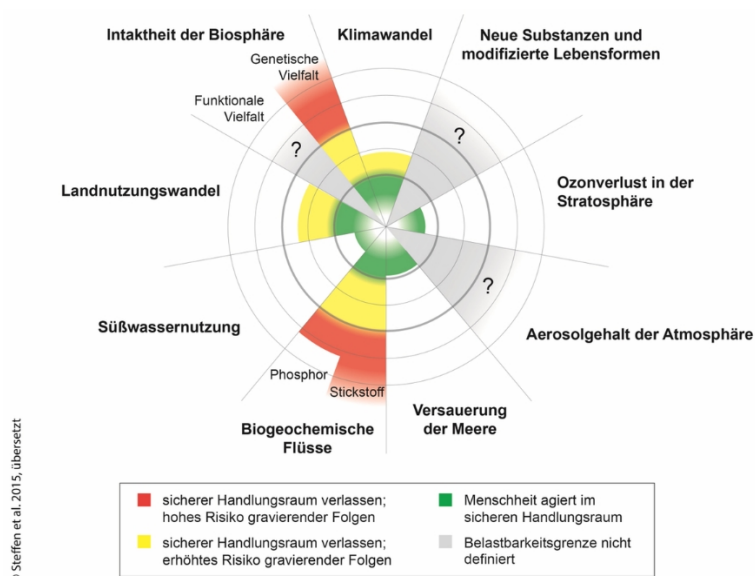


Abbildung 1: Planetare Belastungsgrenzen (Steffen et al. 2015, deutsche Übersetzung BMU o. J.)

1.2 Definition und Ziele

Nachhaltigkeit ist ein Begriff, der bereits vor über 300 Jahren die Forstwirtschaft in Sachsen prägte. Damals forderte Oberberghauptmann von Carlowitz eine *nachhaltende* Nutzung der Wälder, um für kommende Generationen Wald zu erhalten (Carlowitz 1713). 1987 veröffentlichte die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen einen Bericht mit dem Titel „Unsere gemeinsame Zukunft“. Darin ist nachhaltige Entwicklung definiert als „eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt,

ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (Brundtland et al. 1987).

Die Vereinten Nationen (VN) verabschiedeten im Jahr 2015 die Ziele für nachhaltige Entwicklung (VN 2015a), auch Ziele der Agenda 2030 oder Sustainable Development Goals (SDGs) genannt. Mit den SDGs wurde ein Paradigmenwechsel eingeleitet, der auch früh industrialisierte Länder wie Deutschland zu Entwicklungsländern macht, die an zukunftsgerichten Wirtschafts- und Gesellschaftssystemen arbeiten müssen (Martens & Obenland 2017). Das Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) bestätigt, dass die SDGs für Deutschland als Kompass für alle Politikfelder dienen (BMZ 2017).

Waage et al. (2015) zeigen, dass die SDGs, die Infrastrukturen betreffen, wesentliche Funktionen annehmen, um zwischen ökologischen Zielen und den Zielen, die auf das Wohlergehen der Gesellschaft abzielen, zu vermitteln. Thacker et al. (2018) bestätigen, dass Infrastrukturen nachhaltige Entwicklung untermauern. Technische Infrastrukturen mit vernetzten Systemen erbringen grundlegende Dienstleistungen für soziale Infrastrukturen mit unvernetzten Systemen. Anhand von Fallstudien belegen sie, dass vernetzte Infrastrukturen die Erreichung von 72 % der 169 Unterziele der SDGs beeinflussen.

Im SDG 9 zu Industrie, Innovation und Infrastruktur ist als erstes Unterziel gegeben, „eine Hochwertige, verlässliche, nachhaltige und widerstandsfähige Infrastruktur auf[zu]bauen“ (VN 2015a). Im deutschen Kontext untersuchten Trapp et al. (2017) Handlungsfelder für zukunftsfähige Infrastrukturen. Sie bringen „Ressourcenleichtigkeit“ als neues Gestaltungsmerkmal in Ergänzung zu den Forderungen der Widerstandsfähigkeit und den generellen Prinzipien der Daseinsvorsorge (Universalität, Erschwinglichkeit und Zugänglichkeit) ein.

Martens & Obenland (2017) kommentieren das SDG 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur) zur nachhaltigen Entwicklung als zu vage formuliert. Nur schwer lassen sich konkrete Handlungsempfehlungen sowie aussagekräftiger Maße zur Bewertung der Zielerreichung ableiten. Wie dargelegt, sind auch Ausführungen zur nachhaltigen Planung im Wasserbau nur ansatzweise in der HOAI, im zugehörigen Kommentar sowie in den Schriftenreihen der AHO abgedeckt.

2 Nachhaltigkeit im Wasserbau

2.1 Ansatzpunkte für Nachhaltigkeit im Wasserbau

Im Rahmen des Dissertationsprojektes „Massivwasserbau und Naturnaher Wasserbau“ nutzt Parodi (2007) Technik als kulturelle Unternehmung von Gesellschaften als Ausgangspunkt. Beim Vergleich der Wasserbaustile arbeitet er erhebliche Unterschiede in der Gestalt der eingesetzten Wasserbautechnik (z. B. hinsichtlich eingesetztem Material, Größe und Struktur der Ingenieurbauwerke) heraus. Vielfache Gemeinsamkeiten zeigen sich hingegen in den gesellschaftlichen Funktionen (z. B. in der Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser, Energie, Mobilitätsangeboten, Hygiene- und Hochwasserschutzfunktionen sowie kultivierte Landflächen). Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist der Grad der ökologischen Ausrichtung. Während der Massivwasserbau sich vorrangig an gesellschaftlichen Funktionen orientiert, verfolgt der naturnahe Wasserbau zusätzlich ein diffuses ökologisches Zielbündel zur Bewahrung der Existenzgrundlage des Menschen und des nicht-menschlichen Lebens als Selbstzweck. In Bezug auf den Beitrag der beiden Baustile zur nachhaltigen Entwicklung trifft Parodi (2007) per se keine Aussage. In seinen Untersuchungen zeigen sich jedoch naturnahe Bauweisen besser geeignet zur nachhaltigen Entwicklung, sodass er empfiehlt, diese als Ausgangspunkt zu nehmen.

De Vriend et al. (2015) bezeichnen das Bauen mit Natur als einen innovativen Ansatz im Wasserbau, um Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit in Zeiten des rasanten sozialen und ökologischen Wandels zu integrieren. Anhand von Fallbeispielen an Flusslandschaften, Uferzonen und Mündungsgebieten, insbesondere im Hinblick auf die Gewinnung von Retentionsraum (natürlicher Hochwasserrückhalt), zeigen sie, dass Bauen mit Natur ermöglicht, gesellschaftliche Ansprüche an Funktionalität zu gewährleisten und gleichzeitig Raum für die Entwicklung der Natur zu geben. Zusätzlich können weitere Funktionalitäten und Ökosystemdienstleistungen genutzt werden. Über den gesamten Lebenszyklus hinweg geschieht dies dabei oft zu geringeren Kosten im Vergleich zu herkömmlichen technischen Lösungen.

Auch Patt et al. fördern seit 1997 das Verständnis wesentlicher Zusammenhänge zum naturnahen Wasserbau in Deutschland. Sie zeigen konstruktive und gestalterische Möglichkeiten auf, die den rechtlichen Rahmenbedingungen, den erkennbaren Auswirkungen der Klimaveränderungen sowie die Interessenkonflikte zwischen Schutz und Wiederherstellung berücksichtigen. (Patt 2018)

2.2 Vorgaben zur Nachhaltigkeit

Neben Umweltgesetzen in Deutschland und der EU, gibt die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) für Ingenieurbauwerke die „vertiefte Untersuchung zum Nachweis von Nachhaltigkeitsaspekten“ als besondere Leistung in der Leistungsphase 2 vor. Im Kommentar zur HOAI (Locher et al. 2014) wird auf die Schriftenreihen des Ausschusses der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e. V. (AHO) verwiesen. In Heft Nr. 4 zu den besonderen Leistungen bei der Planung von Objekten der Wasser- und Abfallwirtschaft nach Teil 3 Abschnitt 3, § 41 HOAI 2013 (AHO 2017) wird für die vertiefte Untersuchung von Nachhaltigkeitsaspekten „z. B. Energieeffizienz“ angeführt. Zusätzlich ist die „Nachhaltigkeitsbetrachtung“ gelistet mit „vertiefte[n] Untersuchungen, z. B. Ökobilanzierung, Gesundheit [und] Lebenszyklusanalyse“.

In Aufgabenbeschreibungen zu Projekten im Wasserbau müssen nachhaltigkeitsorientierte Kriterien zur Untersuchung daher individuell spezifiziert werden. In einem Projekt zur Wiederherstellung eines Vorflutsystems sind z. B. folgende Kriterien vorgegeben: „Machbarkeit und sonstige Auswirkungen (Vorteile und Nachteile), Nachhaltigkeit, Einklang mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie, Kosten (Investitionskosten, Folgekosten), Genehmigungsfähigkeit“ (LMBV 2015).

In Anbetracht existierender Vorgaben ist es fraglich, ob bestehende Gesetze, die Regelungen der HOAI und individuell festgelegte Kriterien die Komplexität der Nachhaltigkeit ausreichend abbilden können. Im Folgenden wird daher darauf eingegangen, wie Envision zur Nachhaltigkeit im Wasserbau beitragen kann.

3 Envision im Wasserbau

3.1 Anforderungen

Projekte im Wasserbau verursachen weitreichende Eingriffe in die Natur, die mit Veränderungen der natürlichen Lebensgrundlagen einhergehen können. Die Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) und die Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (2007/60/EG) haben die Realisierung von naturnahen Projekten befördert (Patt et al. 2011, Patt 2018). Die Ausweitung der Verfahrensvorschriften werden hingegen im Massivwasserbau als hohe Hürden gesehen, die einen langen Atem von Projektträgern erfordern; zudem sind die Forderungen nach Transparenz und Beteiligung der Öffentlichkeit gestiegen (Held 2016).

Die transparente Gestaltung von Wasserbautechnik nennt Parodi (2007) einen wichtigen Aspekt auf dem Weg zum nachhaltigen Wasserbau. De Vriend (2015) ergänzt dazu, die wichtige Rolle und Aufgabe von Projektteams bei der Umsetzung von Nachhaltigkeit und Multifunktionalität sowie der Einbeziehung von Anspruchsgruppen. Mit anderen Disziplinen muss eng zusammenarbeitet werden, um zu besseren Lösungen zu kommen. Proaktive Ansätze sind gefordert, um Ökosystemdienstleistungen und Anspruchsgruppen von Beginn an zu integrieren. Relevante Akteure müssen mehr tun, als bestehende Regelungen und Gesetze vorgeben. Es stellt sich die Frage, wie Nachhaltigkeit in komplexe Planungs-, Bau- und Betriebsverfahren systematisch und zum Vorteil aller Anspruchsgruppen integriert und gemessen werden kann.

3.2 Envision als Leitfaden für Infrastrukturprojekte

Für den Hochbau wurden Leitfäden und Bewertungssysteme entwickelt, die über gesetzliche Vorgaben hinaus Empfehlungen für den Schutz sozialer, ökologischer und ökonomischer Ressourcen geben. Hierzu zählt z. B. das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) oder das Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Für die Nachhaltigkeit von Infrastruktur hat sich trotz weitreichender Auswirkungen noch kein Leitfaden mit Bewertungs- und Auszeichnungsmöglichkeit erfolgreich etabliert.

Envision schließt die Lücke fehlender Standards für Nachhaltigkeit bei der Infrastrukturentwicklung. Im Jahr 2012 wurde Envision von der Harvard Universität und dem Institut für nachhaltige Infrastruktur (Institute for Sustainable Infrastructure, ISI) veröffentlicht. Alle relevanten Bereiche sind durch 64 Bewertungskriterien in fünf Kategorien abgedeckt. Neben dem hohen Detailgrad zeichnet sich Envision durch seine Allgemeingültigkeit aus. Es ist für alle Arten von technischer bzw. vernetzter Infrastruktur in den Bereichen Landschaft, Wasser, Abfall, Energie, Transport und Information einsetzbar. (ISI 2018)

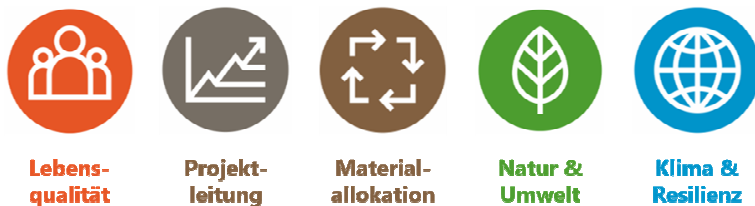


Abbildung 2: Kategorien von Envision (eigene Darstellung nach ISI 2018)

Envision legt einen Fokus auf die Integration von möglichen Nachhaltigkeitsleistungen über alle Projektphasen und -beteiligte hinweg. Für interdisziplinäre Projektteams kann der Leitfaden somit eine systematische Basis sein, der eine gemeinsame Fachsprache für bereichs- und unternehmensübergreifende Kommunikation und Zusammenarbeit liefert. Alle Beteiligten sind damit in der Lage, alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte nachzuvollziehen. (ISI 2018)

Als bewertungsorientierter Leitfaden für nachhaltige Infrastruktur bietet es eine konkrete und detaillierte Bewertungsmatrix, die über die gesetzlichen Vorgaben hinaus geht. Envision bietet 64 Kriterien, mit welchen qualitative und quantitative Nachhaltigkeitsleistungen erfasst, bearbeitet und bewertet werden können. Die transparente Natur des gemeinsamen Vorgehens, steigert Vertrauen in gemeinsam getroffene Entscheidungen. Darüber hinaus kann eine externe Verifizierung die Glaubwürdigkeit erhöhen. (ISI 2018)

3.3 Die fünf Kategorien von Envision

In der Kategorie *Lebensqualität* steht die soziale Dimension mit 14 Kriterien im Fokus. Das Ziel ist, die nachhaltige Entwicklung der Gesellschaft zu fördern, das Wohlbefinden zu steigern und den Zugang zu alternativen Verkehrsmitteln zu erhöhen. Auch die Erhaltung natürlicher und kultureller Ressourcen wird betrachtet. (ISI 2018)

In der Kategorie *Projektleitung* werden zwölf Kriterien betrachtet, die ein signifikantes Engagement und Zusammenarbeit zwischen Vorhabenträgern, dem Projektteam und anderen Anspruchsgruppen gewährleisten. Mechanismen und Prozesse des Nachhaltigkeitsmanagements werden definiert und implementiert. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen schließen z. B. die Lebenszyklusanalyse mit ein. (ISI 2018)

In der Kategorie *Materialallokation* gibt es 14 Kriterien zur Ressourcenleichtigkeit (Reduzierung von Ressourcenverbrauch und -intensität über die gesamte Lebensdauer). Im Fokus steht z. B. der Einsatz recycelter Materialien, die Nutzung von erneuerbaren Energien sowie der Schutz von Trinkwasserquellen. (ISI 2018)

Die 14 Kriterien der Kategorie *Natur & Umwelt* zielen auf den Erhalt der Biodiversität und der Ökosysteme ab. Standorte mit hohem ökologischen oder landwirtschaftlichen Wert sind zu schützen. Oberirdische und unterirdische Wassersysteme sind zu erhalten, zu pflegen und zu regenerieren. (ISI 2018)

In der Kategorie *Klima & Resilienz* zielen insgesamt 10 Kriterien darauf ab, schädliche Emissionen während der gesamten Lebensdauer zu reduzieren. Darüber hinaus wird darauf abgezielt, robuste Infrastrukturen zu planen. Die Bewertung von Risiken und Schwachstellen dient dabei als Basis für die Definition von Strategien und Maßnahmen für die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit (Resilienz). (ISI 2018)

3.4 Möglichkeiten zur Anwendung

Im Wasserbau wird bereits eine Vielzahl der von Envision aufgezeigten Kriterien, wie z. B. in der Kategorie Umwelt & Natur, untersucht. Um die Nachhaltigkeit zu verbessern, sind einige Kategorien jedoch verstärkt zu berücksichtigen bzw. innovative Ideen zu entwickeln.

Envision legt z. B. ein Augenmerk auf die Verwendung von recycelten Materialien und ausgeglichenen Erdarbeiten vor Ort. Es kann dadurch dazu beitragen, das Denken in geschlossenen Materialkreisläufen über die Projektgrenzen hinweg zu fördern. Folglich wird Akzeptanz zur Beimischung von Recyclingmaterialien, wie bei der Oberflächenherstellung von Deichverteidigungswegen, gesteigert.

Auch sind die Kriterien zur Resilienz sehr hilfreich, um z. B. existierende Ansätze zur Resilienz im Hochwasserrisikomanagement bei gesteuerten und ungesteuerten Flutpoldern (Rinnert 2019) zu ergänzen, denn Envision ist im Einklang mit den Leitlinien der ISO 31000 zum umfassenden Risikomanagement (Infrastructure Canada 2019).

In Anbetracht der diversen Herausforderungen ist das Kriterium zu Infrastrukturintegration interessant. Es zielt darauf ab, die funktionale Integration von vernetzten und effiziente Infrastruktursystemen herzustellen. Mit besonderem Augenmerk könnte so z. B. ein alter Tagebau renaturiert werden und simultan als Plattform für schwimmende Solaranlagen (siehe z. B. World Bank Group et al. 2018) dienen.

4 Schlussfolgerung

Die Komplexität von stark nachhaltigkeitsorientierten Planungsverfahren wird durch die bewährte Systematik von Envision handhabbar. Es begleitet dabei mögliche Transformationsprozesse auf Projektebene, die neue Ideen generieren und verbreiten (Griffiths 2019). Darüber hinaus kann Envision als Plattform zur Vermittlung zwischen verschiedenen Weltbildern dienen und

dabei helfen, zwischen gesellschaftlichen Funktionen und ökologischen Zielen zu vermitteln. Durch eine reibungslosere Planung und Umsetzung können so für innovative Projektideen, wie z. B. dem bioökonomischen Management von Wassereinzugsgebieten (siehe z. B. Grosshans et al. 2019), Kapazitäten geschaffen.

5 Literatur

- Bastin, J. F. et al. (2019): Understanding climate change from a global analysis of city analogues. PLOS ONE 14(10): e0224120. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224120> (Zugriff am 04.01.2020)
- BMU (o. J.): Planetare Belastbarkeitsgrenzen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). URL: www.bmu.de/WS4559 (Zugriff am 09.01.2020)
- BMZ (2017): Der Zukunftvertrag für die Welt – Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), Bonn, URL: https://www.bmz.de/de/mediathek/publikationen/reihen/infobroschueren_flyer/infobroschueren/Materialie270_zukunftsvertrag.pdf (Zugriff am 16.12.2019)
- Brundtland, G. H. et al. (1987): Our Common Future. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> (Zugriff am 03.01.2020)
- Carlowitz, H. C. v. (1713): Sylvicultura Oeconomica, Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung Zur Wilden Baum-Zucht Nebst Gründlicher Darstellung. Braun, Leipzig
- De Vriend (2015): Sustainable hydraulic engineering through building with nature. Journal of Hydro-environment Research, Vol. 9, Issue 2, 2015, 159-171
- Díaz et al. (2019): Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. Science, Vol. 366, Issue 6471, URL: <https://science.sciencemag.org/content/366/6471/eaax3100>
- Eckstein, E. et al. (2019): Global Climate Risk Index 2020: Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2018 and 1999 to 2018. German-watch e.V, Berlin
- Grosshand, R. et al. (2019): Sustainable Watersheds for Carbon Offsets: Biomass harvesting for phosphorus capture, habitat renewal and carbon emissions reductions. International Institute for Sustainable Development. URL: <https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/sustainable-watersheds-carbon-offsets.pdf>
- Held (2016): "Talsperren und Nachhaltigkeit gehören zusammen". Wasserbau. URL: <https://www.springerprofessional.de/wasserbau/nachhaltigkeit/-talsperren-und-nachhaltigkeit-gehoren-zusammen-/10029052> (Zugriff am 03.01.2020)

- IISD (2020): The Sustainable Asset Valuation (SAVi) helps policy-makers and investors make informed decisions on financing sustainable infrastructure. URL: <https://iisd.org/savi/> (Zugriff am 07.01.2020)
- Infrastructure Canada (2019): Climate Lens - General Guidance. URL: <https://www.infrastructure.gc.ca/pub/other-autre/cl-occ-eng.html#annexG.methodologies> (Zugriff am 06.01.2020)
- ISI (2018): Envision – Sustainable Infrastructure Framework. Institute for Sustainable Infrastructure (ISI), Washington, DC
- LMBV (2015): Aufgabenstellung zur Wiedherstellung eines Vorflut-systems südlich des ehemaligen Tagebaus Zwenkau. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV)
- Locher, H. et al. (2014): Kommentar zur HOAI – Vertrag, Honorar, Haftung. 12. Auflage, Werner Verlag, Köln
- Martens, J. & Obenland, W. (2017): Die Agenda 2030 – Globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung. Global Policy Forum & terre des hommes, Global Policy Forum, Bonn/ Osnabrück 2017
- Rinnert, C. et al. (2019): Ist Resilienz messbar? Ein Beitrag aus Sicht des Hochwasserrisikomanagements. Wasserwirtschaft, Jg. 109, No. 12
- Patt, H. et al. (2011): Naturnaher Wasserbau – Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. 4. Auflage, Springer, Heidelberg/Berlin
- Patt, H. (2018): Naturnaher Wasserbau – Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2018
- Steffen, W. et al. (2015): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, Vol. 347, Issue 6223
- VN (2015a): Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015 – Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. URL: <https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf> (Zugriff am 03.01.2020)
- VN (2015b): Ziele für Nachhaltige Entwicklung. URL: <https://17ziele.de/downloads.html?> (Zugriff am 03.01.2020)
- World Bank Group et al. (2018): Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report – Executive Summary. Washington, DC: World Bank. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary.pdf>

Autor:

Nina Kumbruck
seecon Ingenieure GmbH
Spinnereistraße 7, Halle 14
04179 Leipzig
+49 341 48405 30
nina.kumbruck@seecon.de

Tobias R. Möller
seecon Ingenieure GmbH
Spinnereistraße 7, Halle 14
04179 Leipzig
+49 341 48405 27
tobias.moeller@seecon.de

Digitale Chancen in der Messtechnik: LowCost-Ansätze für komplexe Messauf- gaben am Beispiel des Modelldeichs der TU Dresden

Dirk Fleischer, Vladislava Kostkanová,
Ulf Helbig, Götz Tintelnot, Thomas Hohlfeld

Im Zuge der Neuerrichtung des Modelldeichs im Wasserbaulabor der TU Dresden und der damit verbundenen komplexen Langzeitversuche, wurden zahlreiche innovative Messtechniken entwickelt, die bei begrenztem Budget einen hohen Grad an Automatisierungspotential und Auswertbarkeit durch digitalisierte Arbeitsabläufe erreichen.

Stichworte: Deich, Messtechnik, Photogrammetrie, Sickerwasser

1 Einleitung

Der Modelldeich (Abb. 1a) im Wasserbaulabor des IWD an der TU Dresden wurde im Rahmen eines AiF-Partnerprojektes mit TPH Bausysteme (Injektionstechnik) und GGL Leipzig (Geophysik) mit dem Ziel des zerstörungsfreien Erfolgsnachweises von Kunststoff-Injektionen mittels geoelektrischer Widerstandstomografie in Deichen und Dämmen errichtet. Der maßstabsgetreue Versuchsstand kann instationäre Hochwasserereignisse unter Variation der Deichprofile nachstellen. Die Laborbedingungen ermöglichen eine intensive Beprobung und Analyse der physikalischen Vorgänge im Deichkörper, wie die Wassersättigung und die Abflusssanglinie an der Drainage.

Hydraulische Versuche an Erdkörpern reagieren als träges System und die Annäherung an einen stationären Zustand kann mehrere Tage dauern. Beim Injektionsvorgang jedoch wird mit hohem Druck ein Gel in die Bodenhypothese gepresst und resultierende Porenwasserdrücke wirken sich augenblicklich auf benachbarte Sektoren aus. Die entwickelten Mess- und Steuerungsverfahren müssen daher in hoher Auflösung automatisiert und kontinuierlich Daten aufzeichnen und verarbeiten können.

Innovationen in der Photogrammetrie ermöglichen die kosten- und anwenderfreundliche Erstellung von 3D-Oberflächenmodellen zur Visualisierung der freigelegten Injektionskörper. Dies in Korrelation mit geotechnischen, geoelektrischen und geohydraulischen Untersuchungen erschließt neue Wege zur Analyse volumenverändernder Prozesse in der Bautechnik.

2 Methoden

2.1 Konstruktion Modelldeich

Der dauerhafte Teil des Versuchsstandes bildet einen wasserfesten Trog, der mit Deichmaterial gefüllt wird. L-Elemente aus Stahlbeton mit einer stabilisierenden Bodenplatte tragen die Lasten (Erdrücke + ca. 2m Wassersäule) in den Hallenboden ab. Ein Querschnitt des Modells ist in Abb. 1b skizziert.

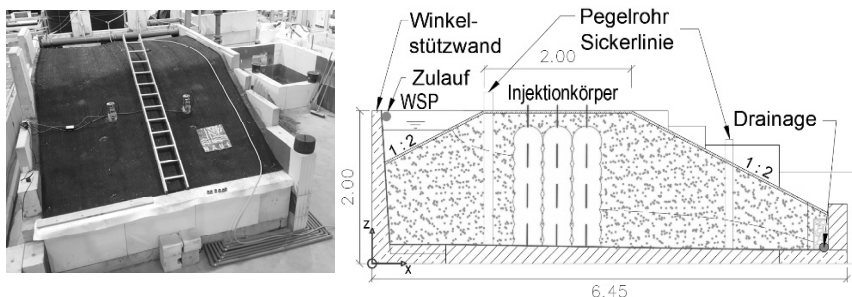


Abbildung 1: 1a: Bsp. Modelldeich Großversuch 1, 1b: Abmessungen Versuchsstand

In die Bodenplatte sind HT-Rohre einbetoniert, die an 6 Stellen den sich einstellenden Wasserdruck an einer außen am Modell angebrachten Pegelharfe anzeigen. Filteraufsätze verhindern das Eindringen von Material in die Rohre. Die Deichbreite wird aus Platzgründen durch Kappen der Böschung reduziert. Baumaterial kann neben dem Modell zwischengelagert werden.

Der Einbau erfolgt wegen besserer Verdichtung mit Überstand zum gewünschten Deichprofil. Die Böschungen werden am Deichfuß mit Kalksandsteinen stabilisiert und anschließend profiliert, wobei auch eine Drainage zur Ableitung des Sickerwassers eingebaut wird (geschlitztes Rohr im Kiesbett mit Filtertextil). Im Einstaubereich ist ein automatisierter Wasserzulauf inklusive Wasserzähler installiert.

Eine Krallmatte aus Geokunststoffen wird an der Oberfläche ausgelegt, um das Deichprofil begehbar zu machen und gleichzeitig vor Erosion durch Trittschritte, Auflasten oder Spritzwasser bei Arbeiten am Deich zu schützen.

Zur Pegelkontrolle können 4 Vertikaldrainagen (perforiertes KG-Rohr DN 120 mit Filtertextilhülle) mittels Brunnenbohrtechnik im Deich installiert werden, wo sich nun ein mit der Sickerwasserlinie (Übergang gesättigter zu ungesättigten Bodenbereich) korrespondierender Wasserstand einstellt.

3 Messaufgaben

Beim Einstau des Deiches lässt sich der Vergleich zu einem großmaßstäblichen 3D-Durchlässigkeitsversuch ziehen. Die langen Sickerwege durch das verdichtete, dadurch nur gering durchlässige Material, erfordern zum Einstellen stationärer Verhältnisse mehrere Tage (d.h. Zufluss entspricht etwa dem Abfluss, die Lage der Sickerwasserlinie ist nahezu konstant).

Solche Langzeitversuche erfordern einen hohen Grad an Automatisierung (hier mit Software DAISYLAB) um eine kontinuierliche Messung (auch nachts) mit begrenzt zur Verfügung stehenden Laborpersonal durchzuführen. Der Charakteristik der Injektionsversuche und Randeffekten des Modells geschuldet, stellt sich im System eher eine 3-dimensionale Sickerfläche ein. Um diese nachzubilden, wird an 10 Stellen im Deich die Druckhöhe gemessen.

3.1 Sickerwasserlinie

Die 4 Vertikaldrainagen werden am oberen Ende mit Ultraschall-Sensoren (FORMAT LRS3 Typ 282) zur Abstandsmessung zwischen Pegelstand im Rohr und Sensorkopf bestückt (Lage im Modell und Messwerte in Abb. 2). Störendes Kondenswasser im Rohr ist durch Belüftung zu vermeiden. Über die Position des Sensorkopfes werden die Pegelstände in das globale Koordinatensystem als z-Werte transformiert.

Die Pegelharfe dient zur analogen Messung der Druckhöhen an 6 Punkten längs zur Deichbreite mithilfe des Prinzips der kommunizierenden Röhren. Somit kann in den Plexiglas-Röhrchen außen am Versuchsstand derselbe Wasserstand abgelesen werden, welcher sich infolge der Druckhöhe aus dem Sickerwasserpegel entlang der 6 Messpunkte einstellt. Eine Webcam zeichnet die Pegelveränderungen auf. Die HT-Rohre sollten vor Messbeginn entlüftet werden, da im Rohr festhängende Luftblasen die Ablesung stören.

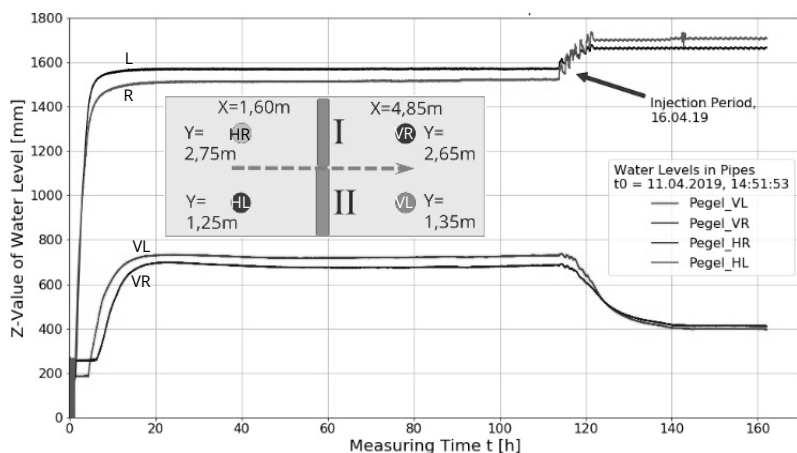


Abbildung 2: Pegelrohre (Lage + Ganglinie) Großversuch 2 (Phase Einstau/ Injektion)

3.2 Zufluss

Die Simulation von Hochwasserereignissen bedarf zur Vermeidung ungewollten Überspülens einer sicheren Einstaukontrolle. Die langen Laufzeiten erfordern einen automatisierten Regelmechanismus. Am Einlauf ist ein elektrisches Ventil installiert, das sich je nach Wasserstand öffnet oder schließt.

2 höhenversetzte Elektroden erfassen den Wasserstand. Sind beide in Wasser getaucht, erfolgt ein elektrischer Impuls zur Schließung des Ventils. Das nun sinkende Wasser gibt beide Elektroden frei, worauf sich das Ventil wieder öffnet. Der Wasserstand wird somit auf der gewünschten Höhe gehalten. Ein Wasserzähler zeichnet die in den Deich fließende Wassermenge auf.

3.3 Abfluss

Die Abflussmessung an der Drainage zur Überprüfung der Dichtwirkung des Deiches und der Kontinuität erfolgt mit einer selbst konstruierten Kippwaage. Diese deckt ein breites Abflussspektrum ab, inkl. die geringen Sickerwassermengen nach Herstellung einer Dichtwand.

Dabei wird jeweils eine der beiden Kammern in der Kippwaage durch das Drainagewasser gefüllt. Ist das kritische Kippgewicht erreicht, entleert sich die Kammer und ein elektrischer Impuls wird registriert. Nun nimmt die zweite Kammer den Wasserstrahl auf (Abb. 3b). Die Kippspiele im Messintervall sind abhängig vom Abfluss. Durch händische Messung des Abflusses und der zugehörigen Anzahl der Kippspiele wird der Zusammenhang ermittelt.

Aus der Veränderung der Zeitspanne zwischen den Kippspielen resultiert somit der jeweilige Abfluss zur Messzeit (Abb. 3a). Zu berücksichtigen ist der Impuls beim Auftreffen des Wasserstrahls.

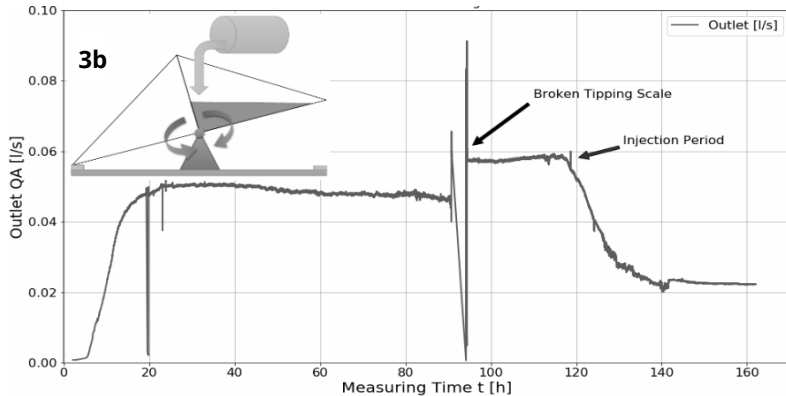


Abbildung 3: 3a: Abflussganglinie Großversuch 2 (vgl. Abb. 2), 3b: Kippwaage

3.4 Geometrie Injektionskörper

Zur Kalibrierung des zu untersuchenden geophysikalischen Nachweisverfahrens für den Injektionserfolg der Deichabdichtung wurden die Injektionskörper freigelegt, wobei nur der standfeste Teil dokumentierbar ist. Die Eindringtiefe der Injektion ist jedoch etwas größer.

Die komplexen lamellenförmigen Injektionskörper erfordern ein innovatives Messverfahren, wobei ein reger interdisziplinärer Austausch mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden (IPF, D. Schneider) auch im Rahmen studentischer Arbeiten sehr zum Projekterfolg beigetragen hat, *Thiessen (2019)*. In der ersten Projektphase kam bereits ein Laserscanner des IPF zum Einsatz, *Kostkanová u. a. (2016)*, welcher bei den Großversuchen 2019 durch einen modernen Leica BLK360 des IPF ersetzt wurde. Eine integrierte Kamera versieht hierbei die gescannte Punktwolke mit einer Textur für ein präzises, farblich sehr reales 3D-Oberflächenmodell. In der allgemeinen geodätischen Praxis amortisieren sich die hohen Anschaffungskosten.

Die geringen Platzverhältnisse und ein hohes Beschädigungsrisiko am Laser führten zur Entscheidung, die bereits bewährte Methode der Photogrammetrie zu testen. Zu beachten sind hierbei die Lichtverhältnisse, die korrekten fotografischen Einstellungen der Kamera und die Aufnahme eines darzustellenden Punktes aus mindestens 2-3 Perspektiven, zusammengefasst:

- ◁ Ausreichende Belichtung auch beschatteter Oberflächen
- ◁ Veränderungen im Schattenwurf (z. B. durch den Fotografen)
- ◁ Grelles blendendes Licht vermeiden, z. B. direktes Sonnenlicht
- ◁ Keine spiegelnden, texturlosen oder durchsichtigen Oberflächen
- ◁ Gleiche Einstellungen für Fokus, Belichtungswert und Blende
- ◁ Aufnahme aus vielen unterschiedlichen Kameraperspektiven

Die Injektionskörper wurden mit Baustrahlern ausgeleuchtet. Über ein Gerüst konnten höher gelegene Fotoperspektiven erreicht werden. Je mehr Aushöhlungen im Injektionskörper vorhanden waren, umso mehr Bilder waren für eine gute Punktdichte erforderlich (je Durchgang 100-150 Bilder).

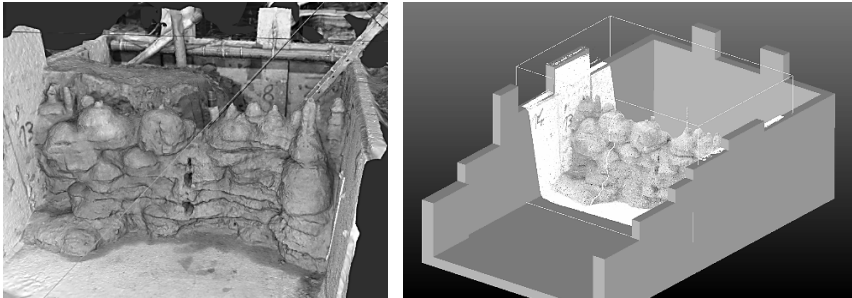


Abbildung 4: Photogrammetrisch erstellte Modelle der Injektionskörper (4a & 4b)

Die freie Software MESHROOM (www.alicevision.org) ist eine Alternative zur Software METASHAPE (www.agisoft.com), welche beide zur Anwendung kamen. Mit wenigen Klicks lassen sich Bilder importieren und daraus ein texturiertes 3D-Modell als *.obj-Datei berechnen (Abb. 4a). Die Berechnung wurde mit einer CUDA-fähigen Grafikkarte NVIDIA GeForce RTX 2080 durchgeführt.

Die Aufbereitung der Ausgabedatei kann mit der ebenfalls freien Software CLOUDCOMPARE (CC, www.danielgm.net/cc/) erfolgen. Zu empfehlen ist das Verkleinern der großen Datei, in dem z.B. die Dichte und Anzahl der Oberflächenpunkte verringert wird, bis die gewünschte Auflösung erreicht ist.

Das Modell muss ebenfalls skaliert werden, da im Vergleich zum Laserscanner keine realen Entfernungen, sondern nur die Lage der Punkte zueinander gemessen wird. Dazu wird z. B. eine *.stl-Datei der Umrandung des Versuchstandes erstellt und in CC importiert. Diese dient als Referenzobjekt mit welcher das Modell der Injektionskörper präzise in den Versuchstand transformiert und skaliert werden kann (Abb. 4b).

Die photogrammetrisch und mit Laserscanner erstellten Punktwolken wurden zur Validierung übereinandergelegt und die Differenzen berechnet. Die damit ermittelten Abweichungen betragen meist weniger als 1cm (Abb. 5a). Die Hauptursache für Abweichungen liegt darin, dass der Laser nur von einer begrenzten Anzahl von Positionen (ca. 5-6) gemessen hat. Bei komplexeren Oberflächen mit Überlappungen und Hohlräumen registriert der Strahl dabei einen Punkt nur einmal oder gar nicht, was in Schattenräumen besonders am linken und rechten Rand des Modells resultiert. Durch die begrenzten Aufstellmöglichkeiten des Laserscanners, konnte dort mit der Photogrammetrie besser gearbeitet werden.

Mit CC kann mittels Integration der Punktentfernung zu einer Referenzfläche auch eine Volumenberechnung erfolgen. Wird die Dichtwand längs der Injektionsachse halbiert, kann über die Schnittfläche integriert werden. Die 2 Teilvolumina ergeben das Injektionskörpervolumen, siehe Abb. 5b. Ein Vergleich mit der injizierten Menge aus den Injektionsdaten gibt Aufschluss über die Porenraumfüllung und damit über die Qualität der Injektion.

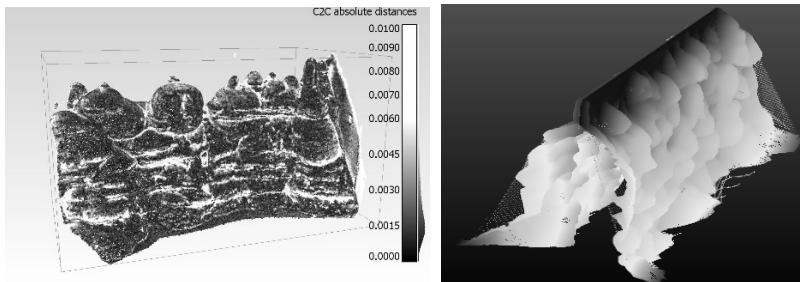


Abbildung 5: 5a: Punktdifferenzen zum Laserscan, 5b: Volumenberechnung

3.5 Geotechnische Beprobung

Am Institut für Geotechnik der TU Dresden werden in der Regel folgende bodenmechanische Kennwerte des Deichmaterials gewonnen:

- ◁ Korngrößenverteilung
- ◁ Hydraulische Leitfähigkeit
- ◁ Einaxiale Druckfestigkeit
- ◁ Wassergehalt
- ◁ Proctordichte / Lagerungsdichte / Korndichte

Die Probenentnahme aus Bodenmaterial sowie aus Injektionskörpern erfolgt mit Rammkernsondierungen, Stechzylindern und Kernbohrgeräten. Die Parameter dienen als Eingangswerte zur numerischen Modellerstellung sowie zur Analyse veränderter Bodeneigenschaften *Thiessen (2019)*. Daraus lassen sich andere Kenngrößen, wie Gehalt an Injektionsmittel oder Porenfüllungsgrad berechnen *Fleischer (2018)*.

Die dokumentierbare Form der Injektionskörper birgt eine hohe Informationsdichte über bodenmechanische und injektionstechnologische Bedingungen (z.B. Lagerungsdichte, Injektionsrate und Injektionsdruck) und eine Korrelation mit den Probeneigenschaften bietet sich an. In Abb. 6a sind die Lageinformationen über die Probekörper dargestellt. Die optische Analyse kann dabei Hinweise auf die Ursache von Anomalien (z. B. in der hydraulischen Leitfähigkeit) geben.

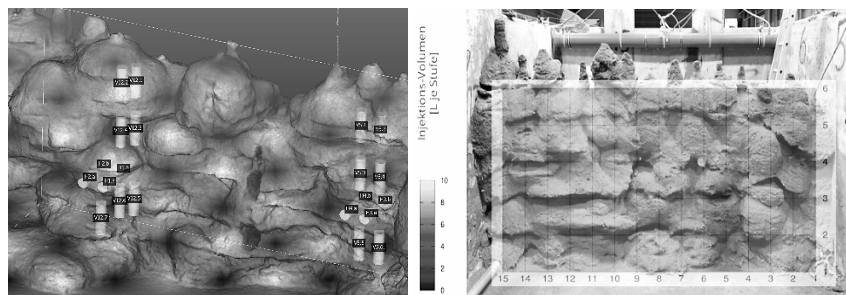


Abbildung 6: 6a: Lageinfo Injektionskörper, 6b: Colormap Injektionsvolumen

Gut erkennbar sind Inhomogenitäten in der Lagerungsdichte, resultierend aus dem Bauprozess. Je Verdichtungshorizont (ca. alle 20cm) bilden sich über die gesamte Breite vorstehende Lamellen am Injektionskörper aus.

Aufgezeichnete Abweichungen der Injektionsparameter lassen sich auch über eine Colormap verdeutlichen (Abb. 6b). Dazu wurde ein Raster (horizontale Achse = Lanzennummer, vertikale Achse = Injektionsebene) mittels GNUPlot erstellt, wobei jeder Knotenpunkt einen zugehörige Wert aufweist (z. B. Injektionsvolumen an der Lanze 5, Ebene 2). Nach Interpolation wird es als transparente Ebene über das Oberflächenmodell gelegt. Signifikante Unterschiede sind in diesem Fall durch überwiegend konstante Injektioneinstellungen aber kaum zu erkennen.

4 Ausblick und Chancen

Für laufende Projekte sind am Versuchsstand weitere Mess- und Steuerungselemente in der Umsetzung und Planung, darunter die Ausrüstung mit einem Echolot für Messungen unterhalb der Wasseroberfläche und die Erweiterung der Einstauregelung auf die gesamte Deichhöhe. An der Pegelharfe sollen Verfahren zur optischen Pegelerkennung untersucht werden. Die automatisierte optische Pegelerkennung erfordert keine preisintensiven Messsensoren, sondern kann mittels einer handelsüblichen Webcam und der richtig angewendeten Bilderkennungssoftware eingesetzt werden.

Der Modelldeich folgt den gesteigerten Ansprüchen der Labor- und Baupraxis hinzu umfassend digital automatisierten Mess- und Regelungsabläufen. In der Regel geht dies aber einher mit höherem Spezialisierungsgrad vermeintlich essentieller Highend-Technologien und Blackbox-Produkten. Deren tatsächliches Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erfassen, konfrontiert den allgemeinen Anwender mit zunehmenden Herausforderungen und kann sich hemmend auf notwendige Digitalisierungsprozesse auswirken.

Die vorgestellten Lösungsansätze sind jedoch vom Grundkonzept her auf ein geringes Budget orientiert. Ihre Stärke liegt in der Kombination aus in der Praxis einfach umzusetzenden mechanisch und elektrotechnischen Konstruktionen und der Anwendung von grundlegenden Programmierkenntnissen. Die Bündelung dieser Fähigkeiten in einem kreativen interdisziplinären Planungsprozess minimiert die Abhängigkeit von Herstellern kostspieliger Mess- und Steuerungsinstrumente sowie Materials und kann damit finanziell nachhaltige Systemlösungen für die Labor- und Baupraxis schaffen. Das gesetzte Ziel der eigenständigen Bewältigung von digitalen Problemstellungen erweitert mit jedem Erfolg den Erfahrungsschatz des Personals und steigert somit die Erfolgsaussichten für nachfolgende Aufgabenstellungen.

Der gelungenen Implementierung der Photogrammetrie liegt der wachsende Pool an frei nutzbaren Software-Komponenten und der breite netzwerkbaasierte Erfahrungsaustausch zwischen den Anwendern zu Grunde, von dem auch die Entwickler profitieren. Die verfügbaren preiswerten Werkzeuge zur Erstellung digitaler Volumenmodelle weisen ein nahezu exponentielles Wachstum möglicher Einsatzbereiche auf. Dass sich diese nicht nur auf Anwendungen oberhalb der Geländeoberfläche erstrecken, beweist eindrucksvoll die hier vorgestellte Schnittstelle zu den Fachbereichen der Geophysik, der Injektionstechnologie, der Bodenmechanik und Geohydraulik.

5 Literatur

- Fleischer, D. (2018): Diplomarbeit. Laboruntersuchungen für die Kalibrierung eines zerstörungsfreien Nachweisverfahrens zur Abdichtung wasserbaulicher Erddämme mittels Kunststoffinjektion. Institut für Geotechnik TU Dresden, unveröffentlicht
- Kostkanová, V. u. a. (2016): BAW-Mitteilungen Nr. 99 – Abdichtung von Damm- und Deichkörpern mittels kunststoffbasierter Dichtungssysteme. 2016
- Thiessen, R. (2019): Diplomarbeit. Großversuche für die Entwicklung einer zerstörungsfreien Erfolgskontrolle zur Abdichtung von Erddämmen mittels Acrylatgelinektionen, Institut für Geotechnik TU Dresden, unveröffentlicht
- agisoft.com: Software METASHAPE, <https://www.agisoft.com/>, (Zugriff Jan 2020)
- alicevision.org: Software MESHROOM, <https://alicevision.org/#meshroom>, (Zugriff Jan 2020)
- danielgm.net/cc/: Software CLOUDCOMPARE, <https://www.danielgm.net/cc/>, (Zugriff Jan 2020)

Autoren:

Dipl.-Ing. Dirk Fleischer
Dr.-Ing. Ulf Helbig

RNDr. Vladislava Kostkanová, Ph. D.

Institut für Wasserbau und THM
Technische Universität Dresden
D-01062 Dresden
Tel.: +49 351 463-32399
Fax.: +49 351 463-37120
E-Mail: dirk.fleischer1@tu-dresden.de
ulf.helbig@tu-dresden.de

DB Netz AG
NBS Dresden-Prag (I.ING-SO-N)
Salomonstr. 21
04103 Leipzig
Tel.: +49 341 2342 4685
E-Mail: Vladislava.kostkanova@deutschebahn.com

Götz Tintelnot

Thomas Hohlfeld

TPH Bausysteme GmbH
Geschäftsführer
Nordportbogen 8
D-22848 Norderstedt
Tel.: +49 40 / 52 90 66 78-0
E-Mail: G.Tintelnot@tph-bausysteme.com

GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH
Geschäftsführer
Bautzner Straße 67
04347 Leipzig
Tel.: +49 341-23 41 63 - 11
Fax: +49 341-23 41 63 - 66
E-Mail: thomas.hohlfeld@ggl-gmbh.de

ZASA – Eine App zur ZustandsAnalyse für StauAnlagen

Antje Bornschein
Reinhard Pohl

Die sachgerechte Bewirtschaftung und Unterhaltung von Stau- und Hochwasserschutzanlagen ist ein wichtiger Bestandteil des Sicherheitskonzeptes. Eine Dokumentation der turnusmäßigen Kontrolle ist erforderlich. Die vorgestellte App soll eine niederschwellige digitale Unterstützung bei der systematischen und einheitlichen Erhebung von Daten zur Überprüfung vor allem kleiner Anlagen bieten und den Betreibern helfen, Schwachstellen selbst zu erkennen. Ziel ist dann, die Anlagen zu ertüchtigen, um Schäden zu vermeiden.

Stichworte: Kleine Stauanlagen, Deiche, Überprüfung, Analyse, Bauwerkssicherheit, Ertüchtigung

1 Motivation

Am 22.8.1977 brach der Damm des Ibrastausees in Hessen (vgl. Tabelle 1). Die Stauanlage war durch die Gemeinde Kirchheim erbaut wurden und sollte den Betreibern einer Hotelanlage bzw. einer Ferienhaussiedlung im Seepark Kirchheim zur Verfügung gestellt werden (*Hessischer Landtag, 1977*). Nach der Fertigstellung des Erdschüttdammes mit Außendichtung erfolgten in der Zeit zwischen Dezember 1975 und Mai 1977 mehrere Probestau an der Anlage. Dabei festgestellte Undichtigkeiten und Leckagen wurden abgedichtet. Eine geplante, endgültige Abnahme am 16.5.1977 erfolgte wegen erneut auftretenden Undichtigkeiten nicht (*Hessischer Landtag, 1977*). Daraufhin sollte der See für eine weitere Reparatur des Dammes abgelassen werden. Jedoch verneinte ein Gutachten eine Gefahr für den Damm und der See wurde nicht abgestaut.

Kurz vor dem Versagen der ca. 10 m hohen Stauanlage, kam es laut Augenzeugen zu einem fontänenartigen Wasseraustritt am luftseitigen Böschungsfuß. Der Bruch erfolgt kurz nach 15.00 Uhr (*HR-Online, 2012*).

Die durch den Bruch verursachte Überschwemmung des unterhalb liegenden Ibratales und mehrere Ortslagen wurde nach Augenzeugen als „kurze Überschwemmung“, gefolgt von einer „Wasserwalze über dem stehenden Wasser“ beschrieben (*Hamburger Abendblatt, 1977*).

Es gab keine Toten. Eine rechtzeitige Warnung der Unterlieger verhinderte vielleicht Schlimmeres. Zahlreiche Häuser wurden beschädigt. Einige Dutzend Schweine und Kühe ertranken (*HR-Online, 2012*). Der Abfluss der Talsperrenbruchwelle verursachte signifikante morphologischen Veränderungen im unterhalb gelegenen Ibratal. Im Nachgang wurde das Ausmaß der Erosions- und Sedimentationsprozesse detailliert dokumentiert (*Glatthaar & Kuttler, 1979*).

Die verschiedenen Angaben zum verursachten Schaden differierten stark. So wurde schon kurz nach dem Ereignis von 30 Mio. DM Schaden ausgegangen (*Hamburger Abendblatt, 1977*), während 4 Monate später in einer offiziellen Stellungnahme immer noch „nur“ 5,5 Mio. DM Schaden als „vorläufige Schätzungen“ genannt wurden (*Hessischer Landtag, 1977*).

Als mögliche Ursachen kommen sowohl Planungsfehler als auch Baumängel in Betracht. Die genaue Ursache wurde jedoch nie ermittelt. Ebenso musste sich niemand für das Unglück vor Gericht verantworten (*HR-Online, 2012*).

Tabelle 1: Versagensbeispiele privater und kommunaler Anlagen für Deutschland

(TS – Talsperre).

Anlage		Besitzer/ Betreiber	Jahr	Höhe [m]	Art des Versagens	Quelle
Ibrastausee		Gemeinde Kirchheim/ privat	1977	9,8	Sickerröhrenbildung oder Kontakterosi- on	Hessischer Landtag (1977)
HRB Gissigheim		Gemeinde Gissigheim	1984	9,7	Überströmung	Hofrichter (2017), Rupp (2007)
HRB Glashütte		Gemeinde Glashütte	2002	8,8	Bruch durch Über- strömung	Bornschein et al. (2002)
HRB Otzdorf		Gemeinde Otzdorf	2011	4,5	Sickerröhrenbildung oder Kontakterosi- on	Bornschein (2014)
Wedelbachteich		privat	2011	kleine Anlage	teilweises Versagen	Mehl (2011)

In den USA brach am 12.3.2004 der Erddamm des privaten Stausees Big Bay Lake. Die stärksten Zerstörungen traten innerhalb der ersten 8 km unterhalb der Stauanlage auf. Direkt unterhalb des Dammes, in einem Gebiet von ca. 700 m Länge und 280 m Breite wurden alle Bäume umgelegt. 53 Häuser und Wohnmobile wurden zerstört, 24 schwer und 24 leicht beschädigt (*Yochum et al., 2008*). Nach einer außergerichtlichen Einigung bezahlte die Versicherung der Big Bay Lake Eigentümer eine Summe von 1 Mio. US \$ an die betroffenen Unterlieger (*WDAM, 2017*).

Aus diesem kurzen historischen Exkurs können folgende Dinge abgeleitet werden. Auch kleinere Stauanlagen können ein großes Schadenspotential besitzen. Bei privaten oder kommunalen Stauanlagen sind sich die Besitzer bzw. Betreiber eventuell dessen nicht bewusst. Im Falle des Versagens solcher Anlagen ist die dokumentierte sachgerechte Bewirtschaftung und Unterhaltung sowie turnusmäßige Kontrolle auch eine Haftungsfrage.

Das Versagen von Stauanlagen ist auch für Deutschland dokumentiert (vgl. *Köhler et al. 2018* und Tabelle 1), wenngleich in den letzten Jahrzehnten eher kleinere Anlagen betroffen waren.

Kleine Hochwasserschutzanlagen oder kleine und kleinste Stauanlagen befinden sich jedoch oft im Eigentum oder der Betreiber-Verantwortung von Kommunen, Firmen, Vereinen oder Privatpersonen. Auch Mühlteiche, Schlossteiche, Fischteiche und andere kleinere Anlagen gehören mitunter privaten Eigentümern oder genossenschaftlich organisierten Verantwortlichen wie z. B. Deichverbänden. Bei kleineren Anlagen sind die verantwortlichen Aufsichtsbehörden oft die lokalen Bauämter.

Mitunter kommt es vor, dass die genannten Akteure selbst nicht über den notwendigen wasserbaulichen und geotechnischen Sachverstand und Erfahrungsschatz, gleichwohl aber eben auch nicht über die notwendigen finanziellen Mittel verfügen, um diesen von Extern einzukaufen.

Gerade Hochwasserschutzanlagen, die für seltene Ereignisse, wie z. B. ein 50- oder 100-jährliches Hochwasser bemessen sind, können so von den Eigentümern oder Betreibern und im Verwaltungsalltag einer Gemeinde schnell „vergessen“ werden.

Eine niederschwellige digitale Unterstützung bei der Überprüfung dieser Anlagen kann Betreibern helfen, Schwachstellen selbst zu erkennen und die Anlagen zu ertüchtigen, um Schäden zu vermeiden.

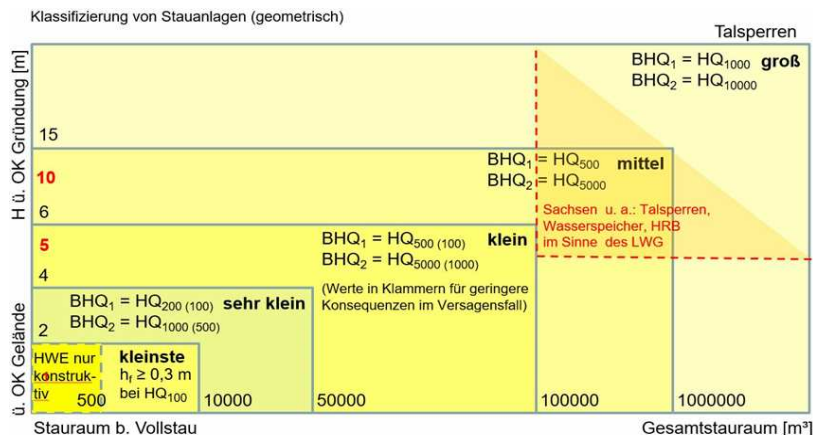


Abbildung 1: Stauanlagen in Deutschland nach ICOLD Kriterium, DIN 19700 T11, DIN 19700 T12, DIN 19700 T14, DWA M-522.

2 Klassifizierung von Stauanlagen

In Deutschland gibt es etwas mehr als 300 große Stauanlagen im Sinne der offiziellen Klassifizierung (Abb. 1). Die Anzahl der kleineren Anlagen ist nicht genau bekannt, weil es hierfür keine zentrale Erfassung gibt. Aus Vergleichsbetrachtungen in Beispielgebieten (vgl. Köhler et al. 2018) kann geschlussfolgert werden, dass die Anzahl der Anlagen in der jeweils nächstkleineren Kategorie sich jeweils wenigstens verdreifacht. Das führt zu einer sehr großen Zahl kleiner und kleinster Stauanlagen, für die die o. g. Überlegungen häufig zutreffen und die vorgestellte Anwendung hilfreich sein kann.

Die Hochwasserschutzanlagen verfügen über eine Klassifizierung, die in der DIN 19712 und im DWA-Merkblatt 507-1 dargestellt ist.

3 Das Sicherheitskonzept von Stauanlagen

In der DIN 19700 „Stauanlagen“ sind die Anforderungen an die Planung und den Bau von Talsperren (Teil 11), Hochwasserrückhaltebecken (Teil 12), Stau-stufen mit Stauhaltungsdämme (Teil 13), Pumpspeicherbecken (Teil 14) und Sedimentationsbecken (Teil 15) dargelegt. Für kleine Talsperren liegt derzeit das Merkblatt DWA-M 522 (2015) mit einem ergänzenden Themenband (DWA

2019) vor. Für die Anwendung der Vorschriften sind die Eigentümer bzw. Betreiber zuständig.

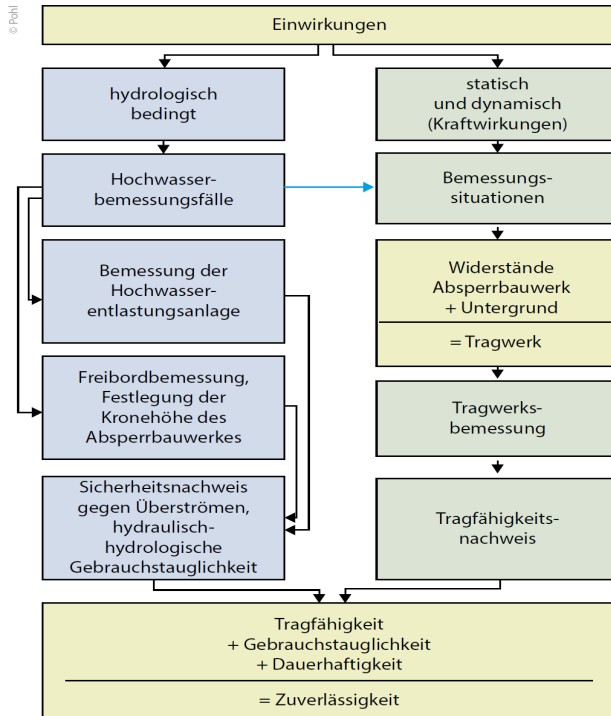


Abbildung 2: Zuverlässigkeitskonzept für Stauanlagen nach DIN 19700 T11, DWA M-522 (Pohl, 2019).

Die Tragfähigkeit, die Funktionsfähigkeit und die Dauerhaftigkeit einer Stauanlage bestimmen zusammen die Zuverlässigkeit oder Bauwerkssicherheit (Abb. 2). Dabei ist die regelmäßige Kontrolle und Überwachung ein wesentlicher Teil im derzeitigen Sicherheitskonzept (vgl. Sieber, 2004). Auch an anderer Stelle wird darauf verwiesen, dass gerade der Nachweis der Dauerhaftigkeit, der z. B. beim Bau einer Anlage nicht per se möglich ist, durch eine turnusmäßige visuelle und messtechnische Kontrolle einer Stauanlage erbracht werden muss und kann (LUBW, 2007). Wichtig ist hierbei deren Dokumentation.

Für kleinere Anlagen gibt es erleichternde Randbedingungen z. B. hinsichtlich des Bemessungshochwassers (vgl. Abb. 1) und der Anforderungen an die

Anzahl der Verschlüsse. Aus den Bemessungskriterien ist ein Teil des Fragenkataloges der mobilen App abgeleitet.

4 Methodik

Anhand von geometrischen, geotechnischen und hydrologischen Daten soll eine Aussage über die Sicherheit einer Stauanlage getroffen werden. Für kleinere Stauanlagen sind hierbei vereinfachte Ansätze möglich, weshalb die Methodik auch nicht für große Absperrbauwerke vorgesehen ist.

Erfasst werden zunächst die allgemeinen Anlagendaten wie z. B. Name und geografische Lage der Stauanlage, gestautes Gewässer, Baujahr und Besitzer bzw. Betreiber. Bei einer vor-Ort-Erfassung der Daten kann die Ermittlung der geografischen Lage auch über den GPS-Sensor des mobilen Endgerätes erfolgen.

Zur Zustandsanalyse von Stauanlagen sind dann weitere Informationen u. a. zu folgenden Punkten nötig:

- ◁ Art und Größe des Absperrbauwerkes
- ◁ Bemessungshochwasserabfluss bzw. -hochwasserstand
- ◁ Böschungsneigungen
- ◁ Vorereignisse
- ◁ Risse, Rutschungen, Setzungen
- ◁ Zustand der Grasnarbe, der Dichtung
- ◁ Grabende Tiere
- ◁ Wasseraustritte

Für Längsbauwerke, wie z.B. Deiche, wird eine Erhebung der Daten entlang des Bauwerkes an mehreren Stellen, z. B. in Anlehnung an die Vorgabe des Erkundungsabstandes aus der DIN 19712 alle 100 Meter empfohlen. Die Auswertung der erfassten Daten soll eine möglichst zutreffende Aussage zum Anlagenzustand und zur Bauwerkssicherheit gestatten.

Wesentlich für die Anwendbarkeit ist dabei eine Auswertungsmatrix auf der Basis begründeter Annahmen, die es erlaubt, auch bei fehlenden Informationen bzw. bei Nichtbeantwortung von Fragen eine relativ verlässliche (Vor-) Einschätzung der Bauwerkssicherheit durchführen zu können, wenngleich dann weiter gefasste Konfidenzgrenzen bei gleichem Vertrauensintervall zu erwarten sind.

5 Funktionalität der App ZASA

Die in Abschnitt 4 beschriebene Methodik wurde als Mobile App, d. h. als Anwendungssoftware für Mobilgeräte (zunächst im Android-Standard) implementiert (Programmierung: Georg Bär und Felix Flocken). Damit kann die Datenerfassung direkt vor Ort an der Anlage erfolgen. Der Name ZASA steht für **Z**ustands**A**nalysen für **S**tau**A**nlagen.

Die App enthält einen Fragenkatalog, der von einem Bearbeiter des jeweiligen Unterhaltungspflichtigen der Anlage vor Ort beantwortet werden kann. Da die Fragebögen auch später wieder geöffnet werden können, ist es möglich, nachträglich weitere Daten hinzuzufügen. Die App erfasst die eingegebenen Angaben und speichert sie. Als Austauschformat wurde mit Tabs formatierter Text gewählt.

Die App erfasst zunächst Daten zur Anlage selbst (Abb. 3). Anschließend erscheinen Fragen zur Tragfähigkeit, zur Dauerhaftigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit (Abb. 4), die anlagenspezifisch ausgewertet und verarbeitet werden.

ZASA	← Allgemein	← Allgemein
ZASA - ZustandsAnalyse StauAnlagen	Name der Anlage: <input type="text"/>	Höhe Absperrbauwerk über Gründung (m): <input type="text"/>
	Geographische Lage: STANDORT <input type="text"/>	Stauinhalt (m³): <input type="text"/>
	gestautes Gewässer: <input type="text"/>	BHQ ₁ (m³/s): <input type="text"/>
	Eigentümer/Betreiber: <input type="text"/>	BHQ ₂ (m³/s): <input type="text"/>
	Art des Absperrbauwerkes: <input type="text"/>	Falls BHQ unbekannt, Abschätzung BHQ ₂ aus Bild 3 DWA-M522, BHQ ₁ ≈ 0,7 · BHQ ₂

Abbildung 3: ZASA Screenshots (Startbildschirm und allgemeine Angaben).

In einem ersten Schritt dient die App der Dokumentation der zur Anlage vorliegenden Daten bzw. weiterer Unterlagen.

The image displays three screenshots of the ZASA app interface, showing questionnaires for 'Dauerhaftigkeit' (Durability) and 'Gebrauchstauglichkeit' (Usability).

Screenshot 1: Dauerhaftigkeit

- Uferveränderungen des Stauesees
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Veränderungen an Erdbauwerken**
- Rutschungen
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Risse
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- sichtbare Setzungen
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- sichtbare Hebungen
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- sichtbare Horizontalverschiebungen
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt

Screenshot 2: Dauerhaftigkeit

- Einschränkung der visuellen Inspektionsmöglichkeiten durch Bewuchs auf der luftseitigen Böschung
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Grabende Tiere
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Veränderungen an Massivbauwerken**
- Risse
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- sichtbare Setzungen
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- sichtbare Horizontalverschiebungen
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Neigungsänderungen, Kippungen
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt

Screenshot 3: Gebrauchstauglichkeit

- Querschnittsreduktion im GA (z.B. durch Bewuchs, Sedimente, Einsturz, ...)
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Fehlstellen, Beschädigungen, Undichtigkeiten
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Fehlstellen, Beschädigungen im Tosbecken
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Schwergängigkeit oder Blockieren des Verschlusses (falls vorhanden)
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt
- Messeinrichtungen (falls vorhanden)**
- Messeinrichtungen funktionsfähig
 - ☐ Ja ☐ Nein ☒ Unbekannt

Abbildung 4: ZASA Screenshots (Fragen zur Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit).

Der zweite Schritt beinhaltet eine Auswertung hinsichtlich lückenhafter, unklarer oder widersprüchlicher Angaben. Eine Liste fehlender Nachweise wird zusammengestellt und ausgegeben. Dies erlaubt dem Anlagenbetreiber, weitere Schritte zur Ermittlung der Daten und Führung der Nachweise zu veranlassen.

Im letzten Schritt wird bei ausreichender Datenbasis eine Anlagensicherheitsbewertung ähnlich einem Schulnotensystem zurückgegeben. Dies erfolgt unter Angabe der jeweiligen Unsicherheit, die dann steigt, wenn wesentliche Informationen nicht zur Verfügung standen. Kriterien, die auf eine mangelnde Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit oder Gebrauchstauglichkeit der Anlage hindeuten, werden zusätzlich tabellarisch zusammengestellt und benannt.

6 Ausblick

Die App existiert zurzeit als beta-Version. In einem nächsten Schritt ist die Testung an realen Anlagen unter Einbeziehung der Betriebserfahrungen geplant.

Die Kalibrierung und Wichtung einzelner Antworten sowie die Ableitung des Streubereiches (Unschärfe) bei nur teilweise vorliegenden Informationen soll an Hand von Schadensfällen und speziellen Betriebssituationen bekannter Anlagen vorgenommen werden.

Perspektivisch wird erwogen, den hinterlegten Algorithmus lernfähig zu gestalten, um eine Vielzahl von Betriebserfahrungen in die Weiterentwicklung und die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Aussage einzubeziehen.

7 Literatur

- BAW-Merkblatt Damminspektion (MDI), Ausgabe 2017
- Bornschein, A.; Aigner D.; Pohl R. (2002): Der Dammbruch von Glashütte. wwt awt, Berlin, Heft 7, S. 6-10
- Bornschein, A. (2014): One-dimensional and two-dimensional hydraulic-numerical modeling of dam break waves. In: Schleiss et al. (eds.) River Flow 2014. Taylor & Francis Group, London, S.1699-1706 (211.pdf)
- DWA-M 522 (2015): Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhalte-becken, Merkblatt Hennef, Mai 2015
- DWA-T3 (2019): Dokumente für kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken. Handreichung für Betreiber ergänzend zu Merkblatt DWA-M 522, Themenheft, Hennef, Juli 2019
- Glatthaar, D., Kuttler, W. (1979): Dammbruchbedingte Hochwasser-schäden auf Talauen. Natur und Museum, Bd. 109, Heft 5, Frankfurt a.M., S. 156-164
- Hamburger Abendblatt (1977): 30-Millionen-DM-Schaden durch Damm-bruch, 195/23.08.1977, S. 14
- Hessischer Landtag (1977): Antwort des Ministers für Landwirtschaft und Umwelt auf die kleine Anfrage des Abg. Stanitzek (CDU) betreffend Staudammbruch in Kirchheim, Drucksache 8/5380 vom 12.12.1977, Landtag Hessen, <http://starweb.hessen.de/cache/DRS/08/0/05380.pdf>, Zugriff am 29.12.2019
- Hofrichter, R. (2017): Chronologie einer Katastrophe. <http://info.koenigheimer.com/koenigheim/hochwasser.htm>, Zugriff am 25.1.2017
- HR-Online (2012): Als der Seepark-Staudamm brach. Hessenschau vom 8.2.2012, <http://www.hr-online.de/website/archiv/hessenschau/hessenschau.jsp?t=20120208&type=v>

- Köhler, A., Bornschein, A., Pohl, R. (2018): Sicherheit mittlerer und kleiner Stauanlagen. Wasserwirtschaft (108)4, S. 24-31
- LUBW (2007): Arbeitshilfe zur DIN 19700 für Hochwasserrückhaltebecken. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- Pohl, R. (2019): Talsperrensicherheit und Folgen bei Überschreiten der Bemessungsannahmen. Wasserwirtschaft 109(2019)5, S. 174-177
- Rupp, A. (2007): Versagen der Stauanlage Gissigheim. In: Erfahrungsaustausch Betrieb von Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg. Berichtsband zur 13. Jahrestagung am 29.11.2006, Dotternhausen, erschienen im September 2007, S. 7-9
- Sieber, H.-U. (2004): Die Berücksichtigung von Risikoaspekten in den Sicherheitsnachweisen für Talsperren nach der novellierten DIN 19700. Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 27, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden
- Singh, V. P. (1996): Dam Breach Modeling Technology. Kluwer Academics Publisher, Dordrecht, The Netherlands
- Yochum, S. E., Goertz, L. A., Jones, P. H. (2008). Case study of the Big Bay dam failure – accuracy and comparison of breach prediction. J. of Hydr. Eng., September, S. 1285-1293, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1285)
- WDAM (2017): <http://www.wdam.com/story/12204070/settlement-reached-in-big-bay-dam-break-trial>, Zugriff am 24.1.2017

Autoren:

Dr.-Ing. Antje Bornschein

Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl

iKD Ingenieur-Consult GmbH
Zur Wetterwarte 50
Haus 337/G
01109 Dresden

Institut für Wasserbau und
Technische Hydromechanik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Tel.: +49 351 88441-26
Fax: +49 351 88441-33
E-Mail: antje.bornschein@ikd-consult.de

Tel.: +49 351 463-
Fax: +49 351 463
E-Mail: reinhard.pohl@tu-dresden.de

Multisensorales ingenieurgeodätisches Bauwerks- und -umfeldmonitoring

Herbert Brockmann
Uwe Sörgel
Patrick Havel
Lutz Röpel
Michael Cramer
Philipp Schneider

Ein ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring ist eine Grundvoraussetzung zur Gewährleistung einer zuverlässig funktionsfähigen und sicheren Verkehrsinfrastruktur. In diesem Kontext hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt bearbeitet um verkehrsträgerübergreifend neue effiziente Monitoringlösungen und -strategien zu evaluieren und soweit sinnvoll praxistauglich weiterzuentwickeln.

Zur Erfassung von Bauwerksdeformationen bzw. Bodenbewegungen wurden Fragestellungen der elektronischen Neigungsmessung, UAV-gestützten Bild- und Laserdatenerfassung sowie satellitengestützten Radar-Technik bearbeitet.

Stichworte: Bauwerksmonitoring, Bauwerksumfeldmonitoring, Neigungsmesstechnik, UAV-basierte Bild- und Laserdaten, Persistent Scatterer SAR-Interferometrie

1 Motivation

Ein effizientes ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring unter Einbeziehung des jeweiligen Bauwerksumfeldes ist ein Fundament zur Gewährleistung einer zuverlässig funktionsfähigen und sicheren Verkehrsinfrastruktur. Vor diesen Hintergrund hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des BMVI-Ressortforschungsprogramms *Expertennetzwerk*, Themenfeld 3 *Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastrukturen erhöhen* das Projekt *Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke* bearbeitet. Als Koope-

rationspartner wurde das Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart zur Bearbeitung der fernerkundlichen Aufgabenstellungen eingebunden. Alle Aktivitäten wurden vom Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes unterstützt.

Am Beispiel der Schleusenanlage Hessigheim/Neckar wurden verkehrsträgerübergreifend drei neue Monitoringlösungen und -strategien evaluiert und soweit sinnvoll praxistauglich weiterentwickelt. Bis dato werden i.d.R. ausschließlich punktbezogene Techniken wie Tachymetrie oder Präzisionsnivelement für die Zwecke des Bauwerksmonitorings eingesetzt. Als potenzielle Alternativen bzw. Ergänzungen unter fachlichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten wurden betrachtet:

- bauwerksgebundene, hochgenaue elektronische Neigungsmesssysteme,
- flächenhaft und ultrahochauflösend arbeitende UAS (Unmanned Aerial System) ausgestattet mit digitalen Bild- und/oder Laser-Sensoren, und
- flächenhaft erfassende satellitengestützte Persistent Scatterer SAR-Interferometrie (PSI).

Eine Basis der geodätischen Aktivitäten waren die interdisziplinär abgestimmten bautechnischen Anforderungen. Darauf aufbauend wurden dann die im Folgenden aufgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzipiert und umgesetzt.

2 Das Projekt Schleusenanlage Hessigheim

Als Projektbasis wurde die Schleusenanlage Hessigheim/Neckar ausgewählt, die aus zwei Schleusenammern, einem mehrfeldrigen Wehr und einem ange-



Abbildung 1: Doppelschleuse Hessigheim

schlossenen Wasserkraftwerk besteht (Abb. 1). Der geologische Untergrund im Raum Hessigheim ist von Instabilitäten geprägt. Durch grundwasserbedingte Auslaugungsvorgänge können sich Hohlräume bilden, die wiederum zu Bodensenkungen führen (Kauther/ Schulze, 2015). Dies hat Auswirkungen auf die Stabilität der Schleusenanlage mit Bodensenkungen von

1 mm/a bis 3 cm/a im unmittelbaren Schleusenumfeld. Aufgrund des ANH-Bedarfes sollten die Projektergebnisse u.a. in die anstehenden Grundinstandsetzungs- und Modernisierungsaktivitäten einbezogen werden. Den entsprechenden drei Teilprojekten (TP) lagen folgende bautechnischen Anforderungen zu Grunde:

- Im TP 1 *Neigungsmesssysteme* wurden zwei Wehrpfeiler mit hochgenau, permanent, drahtlos und automatisiert arbeitende Neigungs- und Temperaturmesssensoren unterschiedlicher Bauart zweier Hersteller installiert und dahingehend untersucht, ob und wie mit diesen Systemen Neigungsänderungen kontinuierlich und hinreichend effizient erfasst werden können. Nachzuweisen waren Neigungsänderungen (Messtoleranz T) von $T = 2 \text{ mm}/10\text{m}$.
- Das TP 2 *UAV-gestützte 3D-Messdaten – Matching und Laserscanning* widmet sich dem Gesamtbauwerk mit dem unmittelbaren Bauwerksumfeld. Mittels ultrahochauflösender UAV-gestützter digitaler Bild- und Lasermessdaten sollten Gelände- und Differenzenmodelle als 10 cm-Quadratgitter mit objektbezogener Stützpunktklassifizierung abgeleitet werden. Nachzuweisen waren Höhenveränderungen von $T \leq 1 \text{ cm/a}$ bei eindeutiger Objektpunktidentifizierung.
- Im TP 3 *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar* wurde zusätzlich das erweiterte Bauwerksumfeld einbezogen. Es sollten ebenfalls Höhenveränderungen von $T \leq 1 \text{ cm/a}$ erfasst werden. Dazu waren die Potenziale der Synthetic Aperture Radardaten (SAR-Daten) des Sentinel-1-Satelliten (STN-1) des europäischen Erdbeobachtungsprogramms *Copernicus* bei kostenfreier Datenverfügbarkeit mit denen des deutschen kommerziellen TerraSAR-X-Satelliten (TSX) gegenüberzustellen.

2.1 TP 1 – Neigungsmesssysteme

Mit dem Ziel, möglichst langzeitliche Neigungsänderungen zu erfassen, wurden exemplarisch zwei Wehrpfeiler mit redundanten Neigungsmesssystemen ausgestattet. Kontrollmessungen mit höherer Genauigkeit, Faktor 10^{-1} , waren realisierbar.

Für einen Vergleich hinsichtlich qualitätsspezifischer Kriterien wurden unterschiedliche Neigungssensoren zweier Herstellern (Wyler, 2020; PC, 2020) eingesetzt, die kontinuierlich Messwerte erfassen. Zum Einsatz kamen umschlagbare Zwei-Achs-Sensoren, die es durch die „Zwei-Lagen-Messung“ ermöglichen systematische Abweichungen nahezu vollständig zu eliminieren (z.B. Sensordriften). Des Weiteren wurden nicht umschlagbare Ein-Achs- und Zwei-Achs-Sensoren unterschiedlicher Preiskategorien eingesetzt (Abb. 2).

Ergänzend sind Temperatursonden in die Betonwände der Pfeiler eingebracht worden, um die Abhängigkeiten zwischen Neigungen und Temperaturen einzubeziehen (Abb. 3). Die Datenauswertung und Zeitreihenanalyse erfolgte mit zwei kommerziellen Softwareprodukten (GKSPro, 2020; jBEAM, 2020). Da diese nicht alle erforderlichen Funktionalitäten bereitstellten, erfolgte darüber hinaus eine bedarfsbezogene Programmierung in Python.

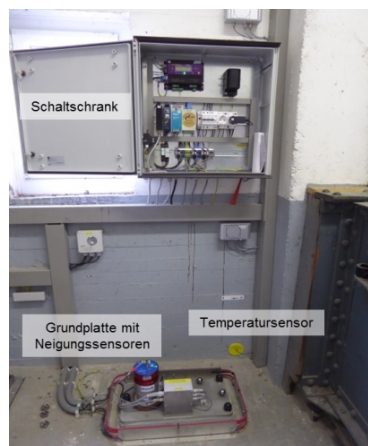


Abbildung 3: Neigungsmesssystem

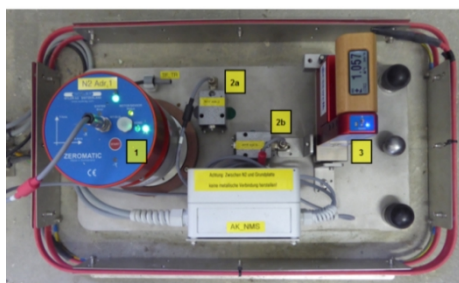


Abbildung 2: Grundplatte mit umschlagbaren [1], nicht umschlagbaren [2a, 2b] Neigungssensoren und manuell aufgesetztem Präzisionsneigungsmesser höherer Genauigkeitsklasse [3]

Laborkalibrierungen zeigten, dass nur die Wyler-Sensoren bei der Messwert-erfassung die einzuhaltende Messunsicherheit (GUM, 2008) von $u = 0,01$ mm/m weitestgehend erreichten. Zwischen den Neigungswerten und Temperaturen bestanden hohe Korrelationen (Abb. 4), insbesondere hervorgerufen durch den Tagesgang der Sonne.

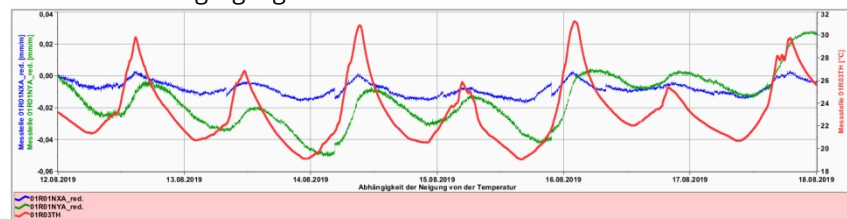


Abbildung 4: Korrelationen zwischen Neigung und Temperatur; **umschlagbarer Sensor**, **nicht umschlagbarer Sensor**, **Betontemperatur**

Die Neigungsmesstechnik ist grundsätzlich für die Detektion von kleinsten Veränderungen im 1/10 mm-Bereich geeignet. Bei der Auswahl der Sensoren hat sich gezeigt, dass die umschlagbaren Sensoren wesentlich genauer arbeiten ($u < 0,1$ mm/m) als die nicht umschlagbaren Sensoren ($u > 0,3$ mm/m). Zur Qualitätssicherung und Plausibilisierung sind redundante Systeme einhergehend mit einer ständigen Kontrolle aller Komponenten geboten. Nur durch eine bedarfsgerechte Analyse der Messdaten und abgeleiteten Zeitreihen stehen belastbare Ergebnisse zur Verfügung.

2.2 TP 2 - UAV-gestützte 3D-Messdaten – Matching und Laserscanning

Die Potenziale von UAV-gestützten Bild- und Lasersensoren waren mit dem Ziel eines flächenhaften Höhenbewegungsmonitorings herauszuarbeiten. Dabei sollten methodische Ansätze, wenn sinnvoll und möglich, optimiert werden.

Es wurden kampagnenbezogen ultrahochauflösende digitale PhaseOne-Kameras iXU-RS 1000 bzw. iXM 100 (PhaseOne, 2020) mit jeweils 100 MPix Bildauflösung eingesetzt. Realisiert wurde damit eine Bodenauflösung von 3,7 mm. Parallel erfolgten Laserdatenerfassungen mit einem RIEGL VUX-1LR (Riegl, 2019) mit einer Rate von bis zu 750.000 Messungen/Sekunde (Abb. 5). Um verlässliche Vergleiche der Flugepochen zu ermöglichen galt es zudem hohe ingenieurgeodätische Ansprüche an die absolute Georeferenzierung der UAV-Bilder und Laserdaten zu stellen. Dazu waren aufwendige, tlw. dauerhaft vermarktete Passinformationen, höhenmäßig mit einer Messunsicherheit von $u = 1$ mm, zu bestimmen.

Die vorgesehenen Auswertungen konnten bislang noch nicht vollständig abgeschlossen werden. Die bisherigen Auswertungen der Bilddaten einzelner Epochen ergaben im Vergleich zu den Kontrollpunkten maximale Abweichungen unter 7 mm. Im unmittelbaren Bauwerksbereich lagen sie unter 2 mm. Vergleichbare Auswertungen der Laserdaten ergaben maximale Abweichungen unter 5 mm. Aus den Einzelepochen als digitale Oberflächen- und Geländemodelle sind final Differenzenmodelle zu berechnen, um letztendlich mögliche Höhenveränderungen anzuzeigen. Dabei ist obligatorisch, dass die Aussagekraft der ermittelten Differenzen von der möglichen Objekt- bzw. Objektpunktidentifizierung abhängig ist. Diesem Sachverhalt tragen die exemplarischen Aussagen der Abb. 6 Rechnung. Im direkten Schleusenbereich liegen die ermittelten Höhendifferenzen zwischen den Epochen bei eindeutiger Objektidentifizierung unter 1 cm.

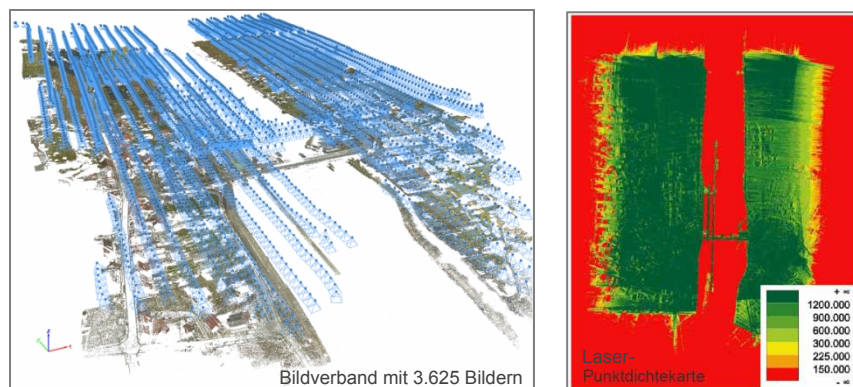


Abbildung 5: Charakteristische Befliegungsparameter in Hessian



Abbildung 6: Differenzenmodell aus Laser-Oberflächendaten, Epochen 03/2019 - 11/2018.

Des Weiteren s. Cramer et al. (2019). Um fachlich und wirtschaftlich abschließende Aussagen treffen zu können, stehen u.a. noch Aktivitäten zur epochenweisen Fusionierung der 3D-Punktwolken aus den Bild- und Laserdaten an.

2.3 TP 3 - Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar

Ein wesentlicher Betrachtungsgegenstand war, ob sich PSI für das Bauwerksmonitoring auch auf der Grundlage der STN-1-Daten (Copernicus, 2020) einsetzen lässt. Da diese SAR-Daten eine vergleichsweise geringe räumliche Auflösung aufweisen (verfügbar waren nur Daten mit einer räumlichen Auflösung von 5 m x 20 m), stellt sich die Frage, ob speziell gebäudespezifisch

sche Deformationen zuverlässig erkannt werden können. Als Vergleichsgrundlage wurde eine Untersuchung der hochaufgelösten SAR-Daten (1 m x 1 m) der kommerziellen TSX-Mission (DLR, 2020) herangezogen.

Bei der SAR/PSI-Datenprozessierung werden relative Bewegungsmuster erfasst. Darum war es zielführend, Möglichkeiten der Georeferenzierung über entsprechend eindeutige Reflektoren (z.B. Corner-Reflektoren) zu realisieren. Wenn Radarbeobachtungen aus zwei Blickrichtungen (Satellitenbahnen Ascending, Descending) vorliegen, können Vertikal- und Horizontalbewegungen berechnet werden.

Eine wichtige Rolle spielt die Verfügbarkeit von SAR-Daten. Die STN-1-Daten haben den Vorteile einer höheren Verfügbarkeit (Abb. 7).

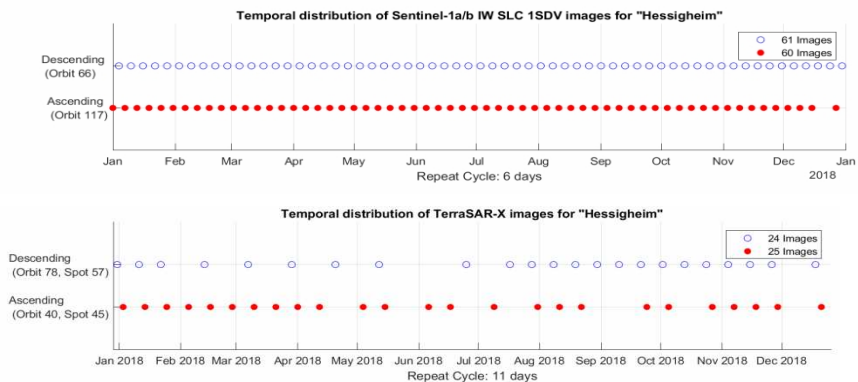


Abbildung 7: Aufnahmezeitpunkte der verwendeten Radarbilder im Jahr 2018

So erlaubt die STN-1-Satellitenkonstellation alle 6 Tage eine regelmäßige, flächenhafte Erfassung. Hingegen sind hochauflösende Systeme wie TSX nicht für eine wiederholte vollständige Abdeckung der Erde im dichten zeitlichen Abstand konzipiert. Die Erfassungen müssen aus kommerziellen Gründen beauftragt werden, sodass Konkurrenzsituationen zwischen Nutzern unvermeidbar sind. Daher kam es zu den Lücken, statt der theoretisch möglichen Anzahl von 33 Aufnahmen in 2018 (Satellitenzyklus von 11 Tagen) wurden nur 24 bzw. 25 realisiert. Letztendlich wurden Bildstapel pro Jahr ausgewertet.

Ein wesentliches Ergebniskriterium ist die auflösungsabhängige Punktdichte der eindeutigen Reflektoren (Persistent Scatterer, PS), denn nur bei hoher Punktdichte können lokale Deformationsprozesse aufgezeigt werden. Die geringe Anzahl mit 450 PS-Punkten bei STN-1 im Testgebiet gegenüber 24.500 bei TSX zeigen schon ein kaum gegebenes STN-1-Nutzungspotenziale,

erst recht in dem hier vorliegenden ländlichen Raum an (Abb. 8). Aus diesem Grund war es nur für die TSX-Analyse sinnvoll, Vertikalbewegungen abzuleiten (Abb. 9).



Abbildung 8: Ausschnitt STN-1 und TSX-Punktdichten **Ascending** / **Descending**

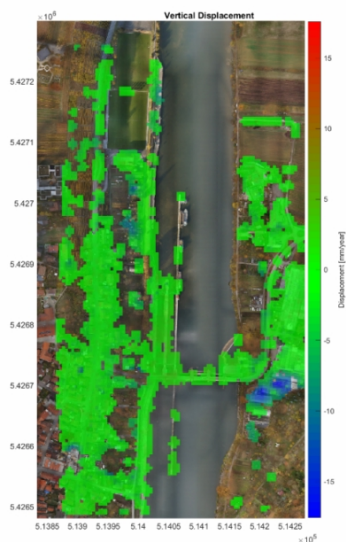


Abbildung 9: Höhenbewegungen, interpoliert
auf ein 5 m-Quadratgitter

Die Ergebnisse zeigen signifikante Höhenveränderungen von ca. 10 mm/a in Teilbereichen des Projektgebietes mit einer Messunsicherheit $u = 2\text{mm/a}$ an. Auswertungen der Bundesanstalt für Wasserbau (Sky-Geo/BAW, 2015) und des ANH bestätigen diese Ergebnisse.

3 Fazit

Die ausgeführten Arbeiten zeigen aussagestarke Ergebnisse an und sind verkehrsträgerübergreifend gültig. Hinsichtlich eines möglichen Praxiseinsatzes sind die Beachtung der fachlichen Nutzeranforderungen und wirtschaftlichen Möglichkeiten obligatorisch. Vor diesem Hintergrund müssen die Ergebnisse betrachtet werden.

Es stehen ausgewählte Neigungsmesssysteme mit zugehörigen Temperatursensoren zur Verfügung, die zuverlässig und belastbar Messdaten kontinuierlich hochgenau und -frequent webgestützt und damit ortsunabhängig bereitstellen. Fundamental ist eine bedarfsgerechte Auswahl der Systeme. So können die Möglichkeiten nur mit zweiachsigen umschlagbaren, aber höherpreisigen Systemen ausgeschöpft werden, um Neigungsänderungen von 0,2 mm/m nachzuweisen. Der Einsatz im Wirkbetrieb an Wasserbauwerken wird zurzeit vorbereitet.

Die flächenhafte hochgenaue Erfassung von Höhenbewegungen von 1 cm/a mittels UAV-gestützter Kamera- und Lasersysteme, einschl. der am Boden zu bestimmenden Passinformationen, ist möglich, aktuell aber noch sehr aufwendig, vor Ort und in der Auswertung. Fachliche und wirtschaftliche Optimierungspotenziale sind offensichtlich. Vor diesem Hintergrund werden insbesondere Weiterentwicklungen zum gleichzeitigen Einsatz beider Sensoren mit einem UAV und zur Fusionierung aller Daten zu einem Nutzerprodukt forciert.

Die STN-1-Daten (5 m x 20 m) sind nicht für das hochgenaue Bauwerksmonitoring geeignet. Optimal sind Daten in der Auflösung von 1 m x 1 m. Welche Potenziale mit den grundsätzlich erfassbaren STN-1-Daten von 5 m x 5 m verbunden sind, ist erst zielführend herauszuarbeiten, wenn sie auch in zeitlich ausreichender Frequenz von der Europäischen Raumfahrtagentur bereitgestellt werden. Davon kann derzeit nicht ausgegangen werden. Inwieweit sich die STN-1-Daten für einen großräumigen Überwachungsdienst für Verkehrsinfrastrukturobjekte nutzen lassen, ist BfG-Gegenstand der aktuell begonnen 2. Expertennetzwerkphase.

4 Literatur

- Copernicus (2020): <https://www.d-copernicus.de/daten/>, 14.01.2020
- Cramer, M. et al. (2019): Potenzial ultrahochauflösender und -genauer UAV-basierter 3D-Datenerfassung, Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF, Wien, Österreich – Publikationen der DGPF, Band 28, 2019
- DLR (2020): <https://www.dlr.de/content/de/artikel/missionen-projekte/terrasar-x/terrasar-x-erdbeobachtungssatellit>, 14.01.2020
- GKSPRO (2020): <http://gks.vision/>, 14.01.2020
- GUM (2008): ISO/BIPM-Leitfaden: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen), Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008
- jBEAM (2020): <https://www.amsonline.de>, 14.01.2020
- Kauther, R.; Schulze, R. (2015): Satellitengestützte Radarinterferometrie – ein neues Werkzeug für die Geotechnik, BAW-Kolloquium „Projekte der Geotechnik an Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau 10./11.02.2015
- PC (2020): <https://position-control.de>, 14.01.2020
- PhaseOne (2020): https://industrial.phaseone.com/iXU_camera_system.aspx, 14.01.2020
- Riegl (2019): http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/RiCOPTER_Brochure_2019-09-02.pdf, 14.01.2020
- SkyGeo/BAW (2015): *TerraSAR-X SpotLight analysis of Hessian, Besigheim and Felsengärten Final Report*. P. Mahapatra, E. Aguilera, P. Mahapatra (SkyGeo), R. Schulze, R. Kauther (BAW), 2015
- Wyler (2020): <https://wylerag.com>, 14.01.2020

Autoren:

Herbert Brockmann
Patrick Havel
Lutz Röpel

Prof. Dr.-Ing. Uwe Sörgel
Dr.-Ing. Michael Cramer
Philipp Schneider

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat Geodäsie & Fernerkundung
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Institut für Photogrammetrie (ifp)
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Str. 24D
70174 Stuttgart

Tel.: +49 261 1306 0
Fax: +49 261 1306 5088
E-Mail: brockmann@bafg.de
havel@bafg.de
roepel@bafg.de

Tel.: +49 711 685 83336
Fax: +49 711 685 83297
E-Mail: Uwe.Soergel@ifp.uni-stuttgart.de
Michael.Cramer@ifp.uni-stuttgart.de
Philipp.Schneider@ifp.uni-stuttgart.de

Angepasstes Wasserverlust- monitoring in der intermittierenden Wasserversorgung

Miran Mastaller
Franz Nestmann

Zur Bestimmung der Wasserverlusthöhen in Versorgungssystemen hat sich international die Methodik der Wasserbilanzerstellung etabliert. Die Bilanz basiert auf der möglichst genauen Quantifizierung aller in ein Versorgungssystem eingespeisten und an die Verbraucher abgegebenen Wassermengen, um auf die Verlusthöhen zu schließen. In einem interdisziplinären Verbundprojekt wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit am KIT/IWG eine angepasste Wasserbilanz für die intermittierende Versorgung, bei der das Leitungsnetz nur in begrenzten Zeitabschnitten mit Wasser beschickt wird, entwickelt und in einem Pilotgebiet der indischen Projektstadt Tiruvannamalai umgesetzt. Dazu war die Konzeption und Implementierung eines angepassten Monitoringsystems erforderlich. Es mussten neben der angestrebten Genauigkeit der Datenerfassung, die Einfluss auf die Auswahl der einzusetzenden Messtechnik hat, insbesondere die gegebenen Randbedingungen des Projekts berücksichtigt werden. Dazu zählten zum einen die Unerfahrenheit des lokalen Betriebspersonals in der Datenerfassung, -digitalisierung und -auswertung sowie zum anderen der zeitlich und finanziell begrenzte Projektrahmen. Unter Abwägung dieser Aspekte wurde der Fokus auf den Einsatz von robuster, in der Bedienung und Wartung einfacher Messtechnik gerichtet. Dadurch sollte die kontinuierliche Datenerfassung und -auslesung durch das Betriebspersonal gewährleistet werden. Um die Genauigkeit der Messdaten zu erhöhen, wurde basierend auf den Ergebnissen einer experimentellen Studie ein Ansatz entwickelt, um den Einfluss der intermittierenden Versorgung auf die Messgenauigkeit der im Kundenbereich eingesetzten Wasserschächte zu quantifizieren und die Messergebnisse diesbezüglich zu korrigieren.

Das implementierte Monitoringsystem umfasste zur Einspeisemessung ein Ultraschalldurchflussmessgerät sowie einen mechanischen Zähler in Kombination mit einer Pegelsonde zur Wasserstandmessung in einem Wasserturm (Abbildung 1). Die Netzaufgabe an die Verbraucher

wurde bei Stichprobenhaushalten mit Einstrahl-Flügelradzählern in Kombination mit Datenloggern gemessen und mittels Stichprobenverfahren auf das gesamte Pilotgebiet extrapoliert. Um die Digitalisierung und Auswertung der Messdaten zu erleichtern, wurde ein MS-Excel-basiertes Tool entwickelt, in dem u.a. die statistische Auswertung der Stichprobenmessungen erfolgt. Anhand der entwickelten Methodik konnten die Wasserverluste im Pilotgebiet auf 21% der eingespeisten Wassermenge bilanziert werden.

Stichworte: Monitoring, Wasserverluste, Wasserbilanz, intermittierende Wasserversorgung

1 Einleitung

Die kontinuierliche Erhebung und Bewertung der Wasserverlustsituation in Verteilungsnetzen ist eine der Grundaufgaben von Wasserversorgern. Diesbezüglich hat sich die Methodik der Wasserverlustbilanzierung, die von der International Water Association (IWA) im Jahr 2000 erstmals in standardisierter Form vorgestellt wurde, weltweit als Stand der Technik eines effizienten Wasserverlustmanagements etabliert (*Lambert und Hirner, 2000*). Im Rahmen dieser Methodik werden alle Wassermengen, die bei einem Versorgungssystem in einem definierten Betrachtungszeitraum eingespeist oder entnommen werden, in einer Wasserbilanz in tabellarischer Form dargestellt. Die Ergebnisse der Wasserbilanz geben einen ersten Aufschluss über die Höhe der aktuellen Wasserverluste im betrachteten Leitungsnetz und dienen der Auswahl und Umsetzung von zielgerichteten Gegenmaßnahmen zur Wasserverlustreduktion (*EPA, 2010*).

Die schlüssige Anwendung der etablierten Wasserverlustbilanzierung erfordert jedoch einige Voraussetzungen, die insbesondere in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern nicht oder nur teilweise gegeben sind. Insbesondere sollte eine möglichst flächendeckende Messung der Rohrnetzabgabe mittels Kundenwasserzählern sowie eine den gemessenen Abgaben entsprechende, volumenabhängige Abrechnung der Kunden erfolgen. Desweiteren wurde die Methodik für kontinuierlich betriebene Verteilungssysteme entwickelt, in denen das Leitungsnetz stets mit Wasser vollgefüllt ist und unter Druck steht. In vielen Ländern weltweit werden die Leitungsnetze jedoch intermittierend betrieben, wobei die Systeme nur in begrenzten Zeitabschnitten mit Wasser beschickt werden und somit zeitweise mit Luft gefüllt sind. Oftmals sind in diesen Netzen auch keine Wasserzähler zur Netzabgabemessung installiert und die Kundenabrechnung erfolgt daher mit einem verbrauchsunabhängi-

gen Fixtarif. Diese Randbedingungen limitieren die schlüssige Anwendung der IWA-Wasserbilanz, die darüber hinaus nicht oder nur bedingt zusätzliche Komponenten der Wasserverluste in derartigen Verteilungssystemen, wie z.B. die Wasserverschwendung im häuslichen Bereich, adressiert.

Im Rahmen des vom Bildungsministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundvorhabens WaLUE (Water Losses in Urban Environment) erfolgte daher am KIT/IWG die Entwicklung einer angepassten Wasserverlustbilanzierung, die die typischen Randbedingungen in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen berücksichtigt (*Nestmann u.a., 2017*). Dazu waren u.a. die Entwicklung eines angepassten Monitoringsystems zur kontinuierliche Datenerfassung und -analyse und dessen Implementierung in einer Versorgungszone (Pilotgebiet) der südindischen Projektstadt Tiruvannamalai erforderlich, die in diesem Beitrag vorgestellt werden.

2 Konzeption und Implementierung des Monitoring-systems

2.1 Übersicht

Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Monitoringsystem und die entsprechende Messtechnik, die im Pilotgebiet Tiruvannamalais implementiert wurden. Die hydraulisch isolierte Versorgungszone wird über zwei separate Leitungsnetze von einem Wasserturm sowie einem Speicherbehälter mit Wasser versorgt. Insgesamt wurden im Rahmen von umfassenden Surveys 714 Hausanschlüsse an die beiden Leitungssysteme registriert.

Durch das Monitoringsystem wurde die gesamte Netzeinspeisung gemessen (siehe Abschnitt 2.2), während die Messung der an die Verbraucher abgegebenen sowie im Kundenbereich tatsächlich verbrauchten bzw. verschwendeten Wassermengen an Stichprobenhaushalten erfolgte (siehe Abschnitt 2.3). Dadurch reduzierte sich der Aufwand für die Implementierung und den Betrieb des Monitoringsystems, was aufgrund der begrenzten personellen und finanziellen Mittel der für die Wasserversorgung Tiruvannamalais zuständigen Stadtverwaltung sowie des Verbundvorhabens zwingend erforderlich war. Bei der Auswahl der Messgeräte wurde der Fokus auf eine möglichst robuste und in der Bedienung und Wartung einfache Messtechnik gelegt, um die kontinuierliche Datenerfassung und -auslesung durch das lokale Betriebspersonal zu gewährleisten. Desweiteren galt es, den Einfluss der Luft in den Rohrleitungen aufgrund der intermittierenden Wasserverteilung in der Konzeption zu berücksichtigen.

Die Messdaten des implementierten Monitoringsystems wurden in regelmäßigen Abständen ausgelesen und anschließend ausgewertet, um anhand der angepassten Wasserbilanz auf die aktuelle Wasserverlustrhöhe im Pilotgebiet zu schließen (siehe Kapitel 3).

Eine ausführliche Beschreibung der angepassten Bilanz sowie der englischsprachigen Notation der einzelnen Bilanzkomponenten, beispielsweise Q_{SIV} für das Volumen der Systemeinspeisung (englisch: System Input Volume), ist in Mastaller und Klingel (2018) gegeben.

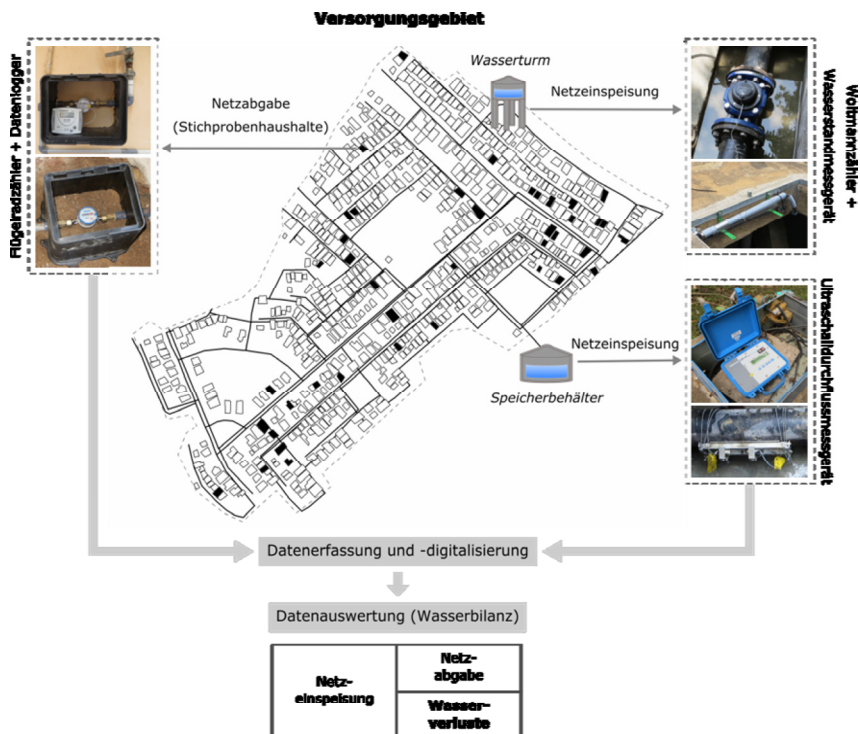


Abbildung 1: Angepasstes Monitoringsystem zur Ermittlung der Wasserverlustrhöhe im Versorgungsgebiet

2.2 Monitoring der Systemeinspeisung

An der Zuflussleitung des Speicherbehälters wurde ein Ultraschalldurchflusssmessgerät installiert. Dazu wurde in den Leitungsverlauf ein Düker integ-

riert, um an der Messstelle einen stets mit Wasser vollgefüllten Rohrabchnitt zu gewährleisten.

Am Wasserturm musste davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit der Messung an der Auslaufleitung durch Luft in der Leitung negativ beeinflusst werden würde. Daher wurde ein mechanischer Woltmannzähler an der stets mit Wasser gefüllten Zulaufleitung des Wasserturms installiert (Abbildung 2). Desweiteren erfolgte die Installation eines zeitlich hoch auflösenden Wasserstandmessgeräts im Turmbehälter.

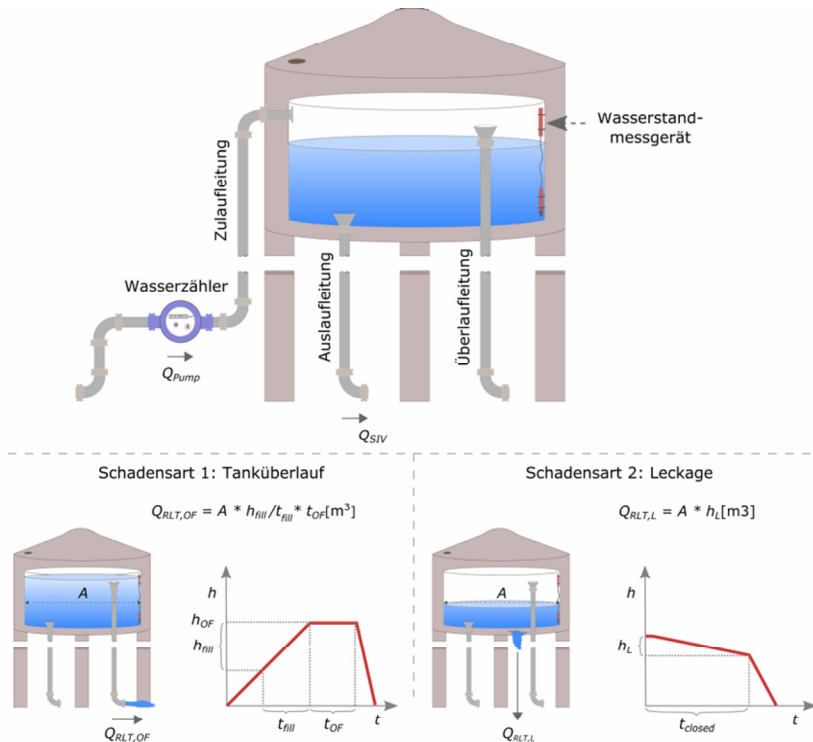


Abbildung 2: Konzept des Einspeise- und Verlustmonitorings am Wasserturm

Der zusätzliche Vorteil dieser Messanordnung ist, dass neben dem Volumen der Systemeinspeisung Q_{SIV} auch die Volumina von möglichen Behälterüberläufen $Q_{RLT,OF}$ und Behälterleckagen $Q_{RLT,L}$ bestimmt werden können. Dies erfolgt, wie in Abbildung 2 veranschaulicht, durch Analysen des Wasserstandsverlaufs und unter Kenntnis der Behältergrundfläche A sowie des Wasser-

stands h_{OF} , bei dem der Überlauf aktiviert wird. Bei gefülltem Behälter und geschlossener Auslaufleitung kann anhand der Wasserstandmessung die Dichtheit des Behälters überprüft bzw. Leckagen detektiert werden.

Q_{SIV} ergibt sich gemäß Gleichung 1 aus der Differenz des in den Wasserturm geförderten und vom Woltmannzähler gemessenen Volumen Q_{Pump} und den möglichen Verlusten am Tank, d.h. der Summe von $Q_{RLT,OF}$ und $Q_{RLT,L}$.

$$Q_{SIV} = Q_{Pump} - (Q_{RLT,OF} + Q_{RLT,L}) \quad [m^3] \quad (1)$$

2.3 Monitoring der Rohrnetzabgabe

Die Ermittlung der Rohrnetzabgabe an die Verbraucher erfolgte anhand von Stichprobenmessungen und der anschließenden Hochrechnung auf das gesamte Versorgungsgebiet mittels statistischer Verfahren. Bei der Auswahl der Stichprobe, deren Umfang mindestens 5% der Gesamtanzahl der Hausanschlüsse abdecken sollte, wurde darauf geachtet, dass diese möglichst repräsentativ ist. Daher erfolgte die Auswahl derart, dass die Zusammensetzung der Haushalte in der Stichprobe möglichst der in der Grundgesamtheit in Bezug auf die Haushaltsgrößen, d.h. die Anzahl der Verbraucher pro Hausanschluss, ähnelt. Um das Risiko einer Änderung des Verbrauchsverhaltens der Haushalte aufgrund der erstmaligen Zählerinstallation zu minimieren, wurde gegenüber den Hausbewohnern betont, dass die Zählermesswerte nur zur Wasserverlustbilanzierung und nicht zu Abrechnungszwecken verwendet werden.

Bei den ausgewählten Haushalten wurde das in Abbildung 3 dargestellte Monitoringkonzept implementiert. Die Darstellung zeigt eine typische Hausinstallation in der intermittierenden Wasserverteilung, bei der die Haushalte die zeitlich limitiert abgegebenen Wassermengen in privaten Tanks speichern, um möglichst rund um die Uhr Wasser im Privatbereich zur Verfügung zu haben. In Tiruvannamalai besteht ein Großteil der Hausinstallationen aus einem ebenerdigen Grundtank, aus dem das gespeicherte Wasser mittels einer Pumpe in einen Dachtank weitergefordert wurde. Aus dem Dachtank erfolgt dann der eigentliche Wasserverbrauch des Haushalts. Bei dieser Art der häuslichen Wasserspeicherung kann es, insbesondere bei verbrauchsunabhängiger Kundenabrechnung wie im Fall Tiruvannamalai, zu einer teilweisen erheblichen Verschwendung zu Lasten des Wasserversorgers kommen. Diese wird typischerweise durch Überläufe der privaten Tanks oder das vorsätzliche Entleeren der Tanks zur Schaffung von Raum für frisches Wasser verursacht (Bradley u.a., 2002; Butler und Memon, 2006).

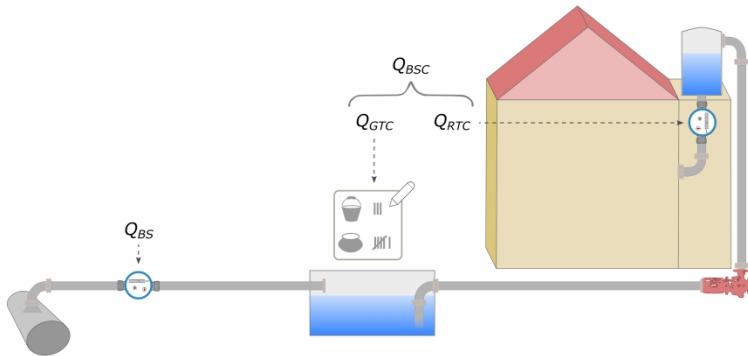


Abbildung 3: Monitoringkonzept bezüglich Wasserverbrauch und -verschwendung im Kundenbereich

Um auf die Höhe der häuslichen Wasserverschwendung schließen zu können, sollte das Monitoringkonzept zum einen die Rohrnetzabgabe Q_{BS} an den Haushalt und zum anderen den tatsächlichen Verbrauch des Haushalts Q_{BSC} erfassen (Abbildung 3). Aus der Differenz zwischen diesen beiden Volumina konnte dann gemäß Gleichung 2 auf die Höhe der häuslichen Wasserverschwendung Q_{BSW} geschlossen werden.

$$Q_{BSW} = Q_{BS} - Q_{BSC} = Q_{BS} - (Q_{RTC} + Q_{GTC}) \quad [\text{m}^3] \quad (2)$$

Die Messung der Rohrnetzabgabe Q_{BS} erfolgte an der Hausanschlussleitung, während der Verbrauch an der Auslaufleitung des Dachtanks Q_{RTC} gemessen wurde. Da jedoch unter Umständen ein Teil des Verbrauchs bereits direkt aus dem Grundtank erfolgen konnte, musste dieses Volumen ebenfalls bestimmt und dem tatsächlichen Verbrauch zugerechnet werden. Daher wurden die Hausbewohner gebeten diesen Grundtankverbrauch Q_{GTC} , bei dem typischerweise Gefäße mit bekannten Volumina verwendet wurden, in Tagesprotokollen zu dokumentieren. Der gesamte Verbrauch Q_{BSC} setzte sich somit aus der Summe des Dachtankverbrauchs Q_{RTC} sowie eines möglichen Grundtankverbrauchs Q_{GTC} zusammen (siehe Gleichung 2).

Für die Abgabe und Verbrauchsmessung wurden robuste Einstrahl-Flügelradzähler eingesetzt. Deren Messgenauigkeit wurde jedoch durch die in der intermittierenden Betriebsweise vorherrschende Luftströmung beim Befüllen der Leitungsnetze beeinflusst. Diesbezüglich wurde im Rahmen der Forschungsarbeit ein Verfahren zur Korrektur der Zählermesswerte hinsichtlich der Luftströmung entwickelt, das auf den experimentellen Untersuchungsergebnissen eines Versuchstands basiert. Dadurch sollten die Zählerwerte um das durch die Luftströmung zu viel gemessene Volumen korrigiert werden, um lediglich die für die Verlustbilanzierung relevanten Wasservolumina zu erhalten. Ausführliche Beschreibungen dazu finden sich in *Walter u.a. (2016)* und *Nestmann u.a. (2017)*.

3 Datenauswertung und Wasserbilanzerstellung

Die Daten des implementierten Monitoringsystems wurden in regelmäßigen Abständen von ca. zwei Monaten durch lokale Mitarbeiter ab- und ausgelesen. Die Datenerhebungen wurden von Deutschland aus anhand von Fotodokumentationen der aktuellen Zählerwerte und durch eine unmittelbare Plausibilitätsprüfung aller Messdaten eng begleitet. Dadurch konnte im Fall von Ablese- oder Datenhandhabungsfehlern direkt Rückmeldung an die Mitarbeiter vor Ort gegeben werden.

Die Auswertung der Daten erfolgte mittels eines einfachen, Microsoft-Excel basierten Werkzeuges. In diesem war neben der statistischen Auswertung der Stichprobenmessungen auch das oben erwähnte Verfahren zur Korrektur der Zählermesswerte hinsichtlich der Luftströmung integriert. Das finale Ergebnis der Auswertung ist die angepasste Wasserbilanz für den jeweils untersuchten Bilanzzeitraum.

Für das Pilotgebiet in Tiruvannamalai konnte aufgrund einer durch u.a. Stromausfälle sowie Geräte- und Bedienfehlern stark limitierten Verfügbarkeit einer vollständigen Datenreihe lediglich eine Wasserbilanz über einen Zeitraum von 40 Tagen erstellt werden. Nichtsdesto-trotz konnte durch diese Bilanz erstmals die Höhe der Wasserverluste in einem Versorgungsgebiet der Stadt zu ca. 20% der Systemeinspeisung beziffert werden. Desweiteren zeigten die Bilanzergebnisse, dass mehr als ein Fünftel der eingespeisten Menge im häuslichen Bereich verschwendet wird und nur ein Viertel des effektiv an die Verbraucher abgegebenen Wasservolumens diesen über den Fixtarif in Rechnung gestellt wird.

4 Fazit

Die erfolgreiche Implementierung des Monitoringsystems und Erstellung der auf den Messdaten basierenden Wasserbilanz bestätigen die Anwendbarkeit der Methodik der angepassten Wasserverlustbilanzierung. Der Stadtverwaltung der Projektstadt Tiruvannamalai konnte anhand der angepassten Wasserbilanz das Potential zur Reduktion der Verschwendung im Kundenbereich sowie zur Anpassung des gültigen Wassertarifs an die tatsächlich abgegebenen Wassermengen und somit zu einer erhöhten Einnahmengenerierung aufgezeigt werden.

Da die Methodik unter Berücksichtigung der typischen Randbedingungen der intermittierenden Wasserverteilung entwickelt wurde, die nicht nur speziell in Tiruvannamalai vorherrschen, ist diese auch auf andere derart betriebene Verteilungssysteme übertragbar. Die pilothafte Umsetzung machte diesbezüglich entscheidende Faktoren zur Sicherstellung einer kontinuierlichen Datenerfassung durch das Monitoringsystem deutlich. Dazu zählen u.a. die Verfügbarkeit von ausreichend Betriebspersonal zur regelmäßigen Datenerhebung und Betreuung des Systems sowie eine umfassende Verbraucherinformation über den Einsatz von Kundenwasserzählern für die Wasserverlustbilanzierung.

5 Literatur

- Bradley, R. M., Weeratane, S., Mediwake, T. M. M. (2002): Water use projections in developing countries. *Journal of the American Water Works Association* 94, Nr. 4, S. 52–63, August 2002
- Butler, David und Memon, Fayyaz A. (2006): *Water Demand Management*. IWA Publishing, London, UK, 2006
- EPA (2010): *Control and mitigation of drinking water losses in distribution systems*. United States Environmental Protection Agency (US EPA), Washington, D.C., USA, November 2010
- Lambert, A. und Hirner, W. (2000): *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures*. International Water Association (IWA), London, UK, Oktober 2000
- Mastaller, M. und Klingel, P. (2018): Application of a water balance adapted to intermittent water supply and flat-rate tariffs without customer metering in Tiruvannamalai, India. *Water Science and Technology: Water Supply* 18(1), S. 347–356, Februar 2018

- Nestmann, F., Klingel, P. und Mastaller, M. (2017): Water Losses in Urban Environment (WaLUE): Entwicklung und Demonstration eines technologie-basierten Geschäftsmodelles zum nachhaltigen Management der Wasserverluste im urbanen Umfeld: Schlussbericht Teilprojekt B. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), November 2017
- Walter, D., Mastaller, M. und Klingel, P. (2016): Genauigkeit von Einstrahl-Flügelradzählern bei Füllung des Rohrnetzes in der intermittierenden Wasserversorgung. gwf-Wasser/Abwasser 157 (12), S. 1125-1134, Dezember 2016

Autoren:

M.Sc. Miran Mastaller

Prof. Dr.-Ing. Franz Nestmann

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Engesserstraße 22
76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608 44418
Fax: +49 721 608 42992
E-Mail: miran.mastaller@kit.edu

Tel.: +49 721 608 42194
Fax: +49 721 608 42992
E-Mail: franz.nestmann@kit.edu

Datenübertragung mittels Messaging System und Containertechnik

Alexander Hartung
Christian Borchardt
Heiko Althoff

Der Fluss Emscher befindet sich in einem hochurbanen Einzugsgebiet mit hohen Versiegelungsgraden. Aufgrund der rasant ablaufenden Hochwasserwellen gewinnt die Datenübermittlung der Gewässerpegel an Bedeutung. Zusammen mit der Fachabteilung Informationstechnologien wurde im Rahmen einer anstehenden Erneuerung Ende 2017 ein Messaging System auf der Basis von Apache Kafka kombiniert mit Docker konzipiert und aufgebaut. Diese Datenübertragung erfüllt die Anforderungen an einen performanten, verifizierten, protokollierten, redundanten und damit ausfallsicheren Transport. Vorgestellt werden die Implementierung des Systems, die Konfigurationswerkzeuge sowie die Erfahrungen aus dem operativen Betrieb.

Stichworte: Datenfernübertragung, Containertechnik, Messaging System, Protokollierung

1 Anforderungen an die Datenfernübertragung in einem hochurbanen Einzugsgebiet

Zunächst wird ein kurzer Abriss über die Datenübertragung bei Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV) der vergangenen 15 Jahre und die Entwicklung zum bestehenden System gegeben. Anschließend werden die Schwächen der bisherigen Implementierungen aufgezeigt und die Prämissen für eine Neukonzeption aufgestellt.

1.1 Die Wege der Datenfernübertragung in den vergangenen 15 Jahren

Der Fluss Emscher befindet sich in einem hochurbanen Einzugsgebiet mit hohen Versiegelungsgraden. Aufgrund der rasant ablaufenden Hochwasserwellen, siehe *Johann Hartung (2016)*, gewinnt die schnelle und zuverlässige Datenübermittlung der Gewässerpegel an Bedeutung. Generell waren die Anforderungen an die Verfügbarkeit hydrometrischer Daten gerade im urba-

nen Umfeld schon immer vergleichsweise hoch, siehe *Grün (2014)*. Daher wurde seit 2005 die Datenfernübertragung der verbandseigenen Gewässerpegel und Niederschlagsstationen über zwei Abrufserver durchgeführt. Trotz einiger Nachteile waren diese Abrufserver seinerzeit eine am Markt verfügbare professionelle Lösung, die die vielen damals noch verwendeten Abrufprotokolle gleichzeitig beherrschte. Die Vielfalt der Datenlogger und damit auch der verwendeten Protokolle wurde in den folgenden Jahren in beiden Verbandsgebieten deutlich reduziert.

Die mehrfach verschobene Ablösung der beiden Abrufserver begann Anfang 2017 mit dem Erwerb einer Client-Server basierten Abruflösung. Wie schon bei dem Vorgängersystem konnte mit dieser Abruflösung neben dem gesamten Pegelmessnetz der Gewässer auch das Niederschlagsmessnetz abgerufen werden. Die Verwendung eines XML-Protokolls öffnete diese Abruflösung auch für Datenlogger anderer Hersteller. Neben dem Datenabruf diente die Client-Server Abruflösung auch zur Administrierung der Datenlogger desselben Herstellers, da in 2018 der sogenannte CSD-Dienst der Telekom ersatzlos entfiel und damit ein Remote Login per GSM auf den Stationen nicht mehr möglich war.

Die weitere Verarbeitung der hydrometrischen Daten nach dem Abruf erfolgte durch zeitgesteuerte Bash-Skripte und darin angestoßene FTP Datentransfers auf die im Haus eingesetzten Zielsysteme. Diese sind das hydrometrische Datenbankmanagementsystem Topodesk, das Vorhersagesystem DelftFEWS sowie unterschiedliche Web Serviceangebote, die die Intranet- und Internet-Darstellung der Pegeldata realisieren.

1.2 Bekannte Probleme

Die Verkettung von Skripten für FTP Transfers und anderen Verarbeitungsschritten war an vielen Stellen fehleranfällig. Es bestand immer das Risiko, dass sich die Prozesse aufgrund eines erhöhten Datenaufkommens und/oder Latenzen selbst überholen, was zu diversen Fehlern führte. Alle Abläufe mussten aufeinander abgestimmt sein und erforderten eine komplexe Überwachung sowie eine aufwendige Wartung. Zusätzlich gab es für sendende Systeme in der Kette keine Bestätigung, dass der Empfänger die Daten angenommen oder gar validiert hätte. Lediglich die Datenlogger pufferten die Daten für den Fall, dass Elemente der nachfolgenden Transportkette nicht verfügbar waren. Schließlich war auch der personelle Support für die gesamte Transportkette schwierig bereit zu stellen, eine alles abdeckende Vertretung war nicht möglich.

Diese Nachteile der vollständigen Transportkette der Daten vom Datenlogger bis zur Zielanwendung waren seit vielen Jahren bekannt. Daher wurde Ende 2017 von der wasserwirtschaftlichen Fachabteilung zusammen mit der Fachabteilung Informationstechnologien (IT) überlegt, wie der gesamte Prozess verbessert werden kann.

Neben dem bisher genannten kamen folgende Aspekte noch hinzu: Erstens stieg die Bedeutung der hydrometrischen Daten für die Hochwasservorhersage und viele andere wasserwirtschaftliche Aufgaben. Darunter waren auch zeitkritische Prozesse wie die Überwachung von Baustellen an Gewässern. Diese Erkenntnis war im Laufe der vergangenen 10 Jahre auf breiter Front innerhalb von EGLV verankert worden.

Zweitens wurde durch die ansteigende Anzahl der Starkregenereignisse der vergangenen Jahre und die damit verbundene Aufmerksamkeit auch die zuverlässige Verfügbarkeit hydrometrischer Daten immer wichtiger.

Drittens stieg aufgrund der Fehleranfälligkeit der bisherigen Transportkette auch die Arbeitsbelastung sowie die Anforderungen an die IT-Abteilung bis hin zu einem IT-Bereitschaftsdienst.

1.3 Prämissen der Neukonzeption

Alles in allem waren das viele gute Gründe, um die bestehende Transportkette grundlegend zu überdenken. Dabei wurden aus Sicht der IT- und der wasserwirtschaftlichen Fachabteilung folgende Prämissen zur Verbesserung des aktuellen Prozesses aufgestellt hinsichtlich:

- ◀ Annahme
- ◀ Erkennen
- ◀ Vorhalten und
- ◀ Verteilen

der hydrometrischen Daten.

Die eingehenden hydrometrischen Daten müssen angenommen, transportiert und anschließend weiteren IT-Systemen zur Verfügung gestellt werden. Dieser Prozess hat performant, für die Anwender transparent und robust zu erfolgen. Die anzubindenden Systeme sind das hydrometrische Datenbankmanagementsystem, die Hochwasservorhersage und die Web-Serviceangebote beider Verbände.

Die Administration benötigt geeignete Werkzeuge, mit denen der Status des Gesamtsystems jederzeit eingesehen werden kann. Im Falle einer Störung müssen die Stakeholder vom System aktiv informiert werden.

Die Konfiguration der Datenübermittlung muss bis auf die Ebene einzelner Geber an den jeweiligen Stationen möglich sein. Durch eine Benutzeroberfläche soll diese Konfiguration für den wasserwirtschaftlichen Fachanwender erkennbar und die Konfiguration unter Beachtung eines Berechtigungskonzepts selbst editierbar sein. Schließlich müssen die Übertragungszustände der Stationen für ebenjenen Fachanwender in einer Benutzeroberfläche gut erkennbar sein, um auf Störfälle schnell reagieren zu können.

2 Umsetzung der Anforderungen

Alle skriptbasierten Verteilungsprozesse für die hydrometrischen Daten wurden durch ein redundant ausgelegtes standardisiertes Messaging System (Apache Kafka) ersetzt. Dieser sog. Message Gateway wird mit der in der IT etablierten Docker-Technologie auf drei virtuellen Servern in entsprechenden Containern aufgesetzt. Der Dienst wird im Verbund verteilt über die Systeme angeboten, wobei ein gemeinsamer Datenbestand über ein Netzlaufwerk angebunden ist.

Die drei Systeme stellen ausschließlich den Kafka-Dienst zur Verfügung, um von anderen Prozessen unbeeinflusst die Daten zu verarbeiten. Das verhindert etwaige Latenzen und sichert die hocheffiziente, Stream-orientierte Delegation der Daten. Die Anbindung der Daten-konsumierenden Systeme erfolgt durch Implementierungen in Apache Camel, einer Routingsoftware. Insgesamt handelt es sich um ein bewährtes und in der IT etabliertes Architekturmuster und Konzept für die vorliegende Problemstellung.

2.1 Bestandteile der IT-Fachlösung

Apache Kafka ist derzeit ein effizienter und stabiler Message Broker und zudem ein OpenSource-Produkt (Apache 2.0 Lizenz).

Eingehende Nachrichten werden entweder innerhalb eines Zeitfensters gesammelt und zusammengefasst, oder es wird eine definierte Anzahl von Nachrichten abgewartet. Dieser Mechanismus wird als Batch-Verfahren bezeichnet. Eine weitere Optimierung des Datenflusses wird durch das integrierte Kompressionsverfahren erreicht, welches die zwischen den einzelnen Systemen im Verbund und der Datenbank zu übermittelnden Daten zusätzlich wesentlich reduziert.

Nachrichten werden in sog. Topics organisiert. Alle Daten im Topic werden so lange vorgehalten, wie es das Regelwerk vorgibt (z. B. die Datenmenge oder das Datenalter als Limit).

Jeder Consumer (Web-Services, Topodesk, Delft-Fews) greift über einen Offset-Pointer auf die Daten zu. Dies funktioniert folgendermaßen, zunächst wird der Speicherort jeder einzelnen Nachricht innerhalb eines Topics eindeutig über die sog. Offset ID identifiziert. Der Pointer des Consumers definiert den aktuellen Lesezeitpunkt. Wurden die Daten korrekt gelesen und verarbeitet, wird die entsprechende Nachricht bestätigt und das nächste Offset gelesen. Grundsätzlich können mehrere Consumer gleichzeitig auf die Inhalte eines Topics zugreifen, d.h. Daten, die in mehreren Anwendungen über unterschiedliche Anfragen verwendet werden, können von jeder Anwendung zu dem Zeitpunkt abgerufen werden, zu dem sie benötigt werden.

Die Versendung der Messdaten vom Datenlogger erfolgt über das Internet mit dem Standard http Protokoll. Das Versandziel ist ein Loadbalancer in der DMZ (demilitarized zone) unseres Providers, der die eingehenden Daten auf zwei Proxy-Webserver verteilt. Diese leiten die Eingangsdaten innerhalb der Request-Verarbeitung (Abarbeitungslogik auf der Serverseite, die ausgeführt wird, bevor der anfragende Client eine Rückmeldung erhält) direkt an den Kafka-Cluster und bestätigen den Datenloggern nur im Erfolgsfall die Übertragung. Im Fehlerfall wird ein http Fehlercode zurückgegeben, der die Datenlogger dazu veranlasst, die Daten zu puffern und eine erneute Übertragung zu starten.

Der Message Broker wird im Cluster über drei virtuelle Maschinen verteilt betrieben (siehe Abbildung 1:). Das Cluster Management erfolgt dabei über Apache Zookeeper je System im Verbund.

Alle zusätzlichen Funktionen werden nicht auf den Kafka-Servern bereitgestellt sondern erhalten entkoppelte Systemressourcen. So wird eine hohe Performance des Kafka-Dienstes sichergestellt.

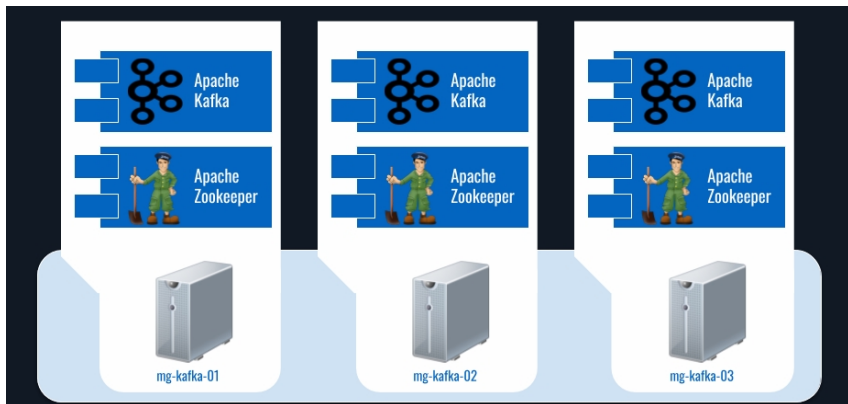


Abbildung 1: Das Cluster Management des Apache Zookeeper

Die dauerhafte Speicherung der Daten stellt eine PostgreSQL-Datenbank sicher. Diese wird als separater Docker-Container mit ebenfalls drei virtuellen Systemen bereitgestellt. Die Datenbankdateien liegen dabei auf ebenfalls auf einem Netzlaufwerk, das an allen Maschinen verfügbar ist.

Docker-Container kapseln alle Abhängigkeiten eines Software-Produkts inkl. Betriebssystem-Kernel in eine Deployment-Unit, also ein Datenpaket, das konsistent und isoliert bereitgestellt werden kann. Zur Laufzeit sind alle Container-Dienste über das von Docker bereitgestellte virtuelle Netzwerk miteinander verbunden.

Jeder Container, der Daten mit der Infrastruktur austauschen muss, erhält beim Start ein entsprechendes Volume (logisches Laufwerk / virtuelle Festplatte), sodass keine veränderlichen Daten innerhalb der Container gehalten werden (Immutable Container).

Docker Swarm fügt die Cluster-Funktionalität für die Docker Container hinzu. Die Konfiguration gibt vor, welche Container in welcher Anzahl verfügbar sein müssen. Fällt ein Cluster-Node aus oder tritt aus einem anderen Grund ein Fehler innerhalb eines Containers auf, startet Swarm diesen einfach auf einem anderen Knoten des Clusterverbundes neu. Um den Status des eigenen Systems, der Netzwerkverbindung und den Status der anderen Knoten besser zu interpretieren, wird eine ungerade Anzahl an Systemknoten empfohlen.

2.2 Administration für die wasserwirtschaftliche Fachabteilung

Zur Administration der bereitgestellten Dienste wurden mehrere browserbasierte Masken (siehe Abbildung 2:) entwickelt, mit denen die einzelnen Geber (Wasserstand, Fließgeschwindigkeit, Niederschlagshöhe, Lufttemperatur, Luftfeuchte ...) einer Pegel- oder Niederschlagsstation in den Datentransport integriert werden können (siehe Abbildung 3:). Diese geberspezifische Administration ist zwar aufwendig aber auch notwendig, um die spezifischen Anforderungen an einer Station (Redundanz, Alarmmeldungen, Einbindung in übergeordnete Steuerungssysteme) zu erfüllen.

EGLV Message Gateway

Stationen

Arbeitsbereich: ws02 ▾

Unbekannte Stationen: 0

Unbekannte Kanäle: 2

Stationen ohne Meldung:

Stationen

☒ Alle Stationen

☐ Gruppierte Stationen

☐ Kritische Stationen

10119	Adenauerallee	aktiv	V301732	04.12.2019 12:36	04.12.2019 13:13
10124	AmStadthafen	aktiv	V584	22.05.2019 09:11	23.10.2019 13:37

Abbildung 2: Stationsübersicht im Message Gateway

Kanäle		Datenpakete			
Adenauerallee					
Kanal-ID	Kanalname	Kanalstatus	Einheit	Zielsystem	Änderungsdatum
<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
10	Wasserstand Radar	aktiv	cm	Timeseries, Topodesk, Page...	04.12.2019 13:14
11	Wasserstand CBS	aktiv	cm	Timeseries, Topodesk, Page...	05.12.2019 06:02
810	GSM_Signalstaerke	aktiv	dB	Timeseries, Topodesk, Page...	04.12.2019 13:14
99	Betriebsspannung	aktiv	V	Timeseries, Topodesk, Page...	04.12.2019 13:16

Abbildung 3: Geberübersicht einer Station im Message Gateway

Weiterhin werden in den grafischen Oberflächen der Status des Systems sowie Fehlermeldungen einfach visualisiert, mit der Möglichkeit, Details sowie Ursachen von Abbrüchen oder fehlerhaften Übertragungen zu recherchieren.

Als unterschiedliche Typen hydrometrischer Stationen sind bisher Gewässerpegelstationen, Niederschlagsstationen sowie kombinierte Niederschlags- / Klimastationen eingebunden worden. Eine Erweiterung des Systems ist denkbar und möglich.

3 Erfahrungen aus dem operativen Betrieb und Aspekte der Weiterentwicklung

Die Entwicklung des Systems begann im vierten Quartal 2018, wobei direkt von Beginn an ein lauffähiger Prototyp den Datentransport von rund 30 ausgewählten Stationen im Feld sowie einer „Büroteststation“ durchgeführt hat. Mit dieser agilen Vorgehensweise konnten schon während der Entwicklung wertvolle Erfahrungen gesammelt werden.

3.1 Erfahrungen aus der Entwicklung des Systems

Eine wertvolle Erkenntnis aus der Entwicklungsphase des Systems ist die regelmäßige Überwachung der Datenvolumina auf Mobilfunkkarten, insbesondere wenn Fehlermeldungen durch ausbleibende Daten transportiert werden. Dieser „zusätzliche“ Datentransport übersteigt bei veralteten Vertragskonditionen schnell die vereinbarten Datenvolumina und verursacht dann erhebliche Mehrkosten. In der Folge wurde ein Monitoring auch für die Mobilfunkverträge der hydrometrischen Stationen aufgesetzt und alle Verträge aktualisiert. Weiterhin wurde das Monitoring der Fehlermeldungen aktiver gestaltet, um zukünftig schneller handeln zu können.

3.2 Erfahrungen aus dem Betrieb des Systems

Anfang des Jahres 2019 wurde ein Testbetrieb mit rund 40 Stationen aufgenommen. Im zweiten Quartal 2019 waren dann alle Entwicklungen und Vorbereitungen soweit abgeschlossen, dass zum 01. Mai 2019 rund 80 Pegelstationen sowie 40 Niederschlagstationen eingebunden wurden. Damit startete der reguläre Betrieb des Message-Gateways.

In der Folgezeit bis zum Jahresende 2019 kam es dann zu vier kleineren Ausfällen von wenigen Stunden bis zu einem gesamten Wochenende. Die Ursachen hierfür bestanden immer im Ausfall wichtiger Bestandteile im Umfeld des Message-Gateways. So fanden Ausfälle bei den Consumern, in der Netzwerktechnik des Serverhousing und ein Ausfall der Server statt. Bei den Consumern ließen sich die Ausfälle auf nicht aufgefallene Inkompatibilitäten der älteren Betriebssysteme inkl. ihrer Softwarebestände zurückführen. Sowohl der Kafka-Cluster, als auch der Docker-Swarm-Cluster zeigten bisher keine Ausfälle.

Im Ergebnis ermöglicht das Message-Gateway trotz der Ausfälle einen robusten und zuverlässigen Betrieb. In der Mehrzahl der Ausfälle wurden die Daten im Anschluss automatisch nachgeliefert und die bestehenden Lücken wieder aufgefüllt. Die robuste Pufferfunktion des Gesamtsystems Datenlogger und Datenübertragung hat sich bewährt.

3.3 Ausblick auf die weitere Entwicklung

Während der Vorbereitungen zu diesem Artikel ist die Weiterentwicklung des Message-Gateways beschlossen worden: Zur Überführung in den operativen Betrieb wird eine Testumgebung geschaffen, damit Weiterentwicklungen und Tests nicht das Produktivsystem beeinflussen. Weiterhin sind Vereinfachungen in der Administration und Bedienung des Systems angedacht, zum Beispiel die Sammelquittierung von Fehlermeldungen einer oder mehrerer Stationen. Schließlich wird das Monitoring dahingehend erweitert werden, dass nicht nur die vorhandenen Prozesse, sondern auch der Output der Prozesse sowie die Proxy-Webserver zukünftig mit überwacht werden.

Insgesamt bestätigen aber die bis hierhin gesammelten Erfahrungen die in das System gesetzten Erwartungen. Eine nachweisbare Vereinfachung und Effizienzsteigerung der Prozesse wurde erzielt. Die enge Zusammenarbeit der Abteilungen hat wesentlich dazu beigetragen.

4 Literatur

- Johann, G.; Hartung, A. (2016): How to manage flood forecasting in a catchment with high flood risk - experiences from the Emscher. In: FLOODrisk 2016. 3rd European Conference on Flood Risk Management. Innoavation, Implementation, Integration. 18.-20.10.2016, Lyon
- Grün, E.; Johann, G.; Pfister, A. (2014): Hochwassersicherheit im urbanen Raum. Schriftenreihe zur Essener Tagung 19.-21.03.2014, Gewässerschutz – Wasser – Abwasser, ISBN 978-3-938996-40-9, S. 34.1-15, Aachen, 2014

Autoren:

Dr. Alexander Hartung

Christian Borchardt

Emschergenossenschaft
Gruppe Pegelwesen & Abfluss
Kronprinzenstraße 24
45128 Essen

Emschergenossenschaft
Gruppe Servicemanagement
Kronprinzenstraße 24
45128 Essen

Tel.: +49 201 104 2673
Fax: +49 201 104 3149
E-Mail: hartung.alexander@eglv.de

Tel.: +49 201 104 2937
Fax: +49 201 104 3544
E-Mail: borchardt.christian@eglv.de

Heiko Althoff

Emschergenossenschaft
Abteilung Informationstechnologie
Kronprinzenstraße 24
45128 Essen

Tel.: +49 201 104 2224
Fax: +49 201 104 771 2224
E-Mail: althoff.heiko@eglv.de

Agentenbasierte Logistiksimulation im mobilen Hochwasserschutz

Simon Jegelka
Patrick Kluding
Wilhelm Nüßer

Die Simulation von Arbeitsprozessen wird ein immer wichtigerer Faktor, um schnell, situationsgerecht und transparent handeln zu können. Dies gilt auch im Bereich des Wasserbaus und im Speziellen dem mobilen Hochwasserschutz. Der Artikel zeigt anhand des Praxisbeispiels der Stadt Köln auf, wie eine agentenbasierte Simulation der Logistikprozesse den mobilen Hochwasserschutz dynamisiert, Unsicherheiten reduziert und eine hochwassersynchrone Reaktion ermöglicht. Der Transfer der Ergebnisse eines Forschungsprojektes in die Praxis ist hierbei erfolgreich gelungen.

Stichworte: mobiler Hochwasserschutz, agentenbasierte Simulation, Logistikabläufe, Köln, Transfer von Forschungsergebnissen

1 Einleitung

Die Simulation von Arbeitsprozessen zur Entscheidungsunterstützung und Optimierung von Abläufen wird in vielen Industrien ein immer wichtigerer Faktor, um schnell und transparent handeln zu können.

Um die Nutzung von Simulationsmodellen aus anderen Industrien auf den mobilen Hochwasserschutz zu übertragen, wurde im Jahr 2015 im Rahmen des Spitzenclusters der Bundesregierung „Intelligente technische Systeme Ostwestfalen-Lippe“ (it's OWL) das Transferprojekt TopoOpt aufgesetzt.

Gemeinsam mit den Stadtentwässerungsbetrieben Köln, AöR, welche im Kölner Stadtgebiet für den operativen Hochwasserschutz entlang 70 km Rheinlinie zuständig sind, wurden die forschungsnahen Transferergebnisse daraufhin in der Praxis umgesetzt. So konnte im Jahr 2019 das simulationsgestützte Entscheidungsunterstützungstool PLATHO in Betrieb genommen werden. Die hierzu notwendige Weiterentwicklung und Anwendung der Forschungsannahmen auf die komplexe Realität des mobilen Hochwasserschutzes brachten weitere Erkenntnisse und Ergebnisse, die nachfolgend beschrieben werden.

Grundlegende Idee des Vorhabens ist es, die Reaktionsfähigkeit des mobilen Hochwasserschutzsystems auf die dynamischen Umweltbindungen eines Hochwasserereignisses zu verbessern. So gleicht sich keine Hochwasserwelle in den Punkten Steiggeschwindigkeit, Zwischen- und Endpegel sowie der Gesamtzeitdauer, wie der anstehenden Abbildung 1 beispielhaft zu entnehmen ist.

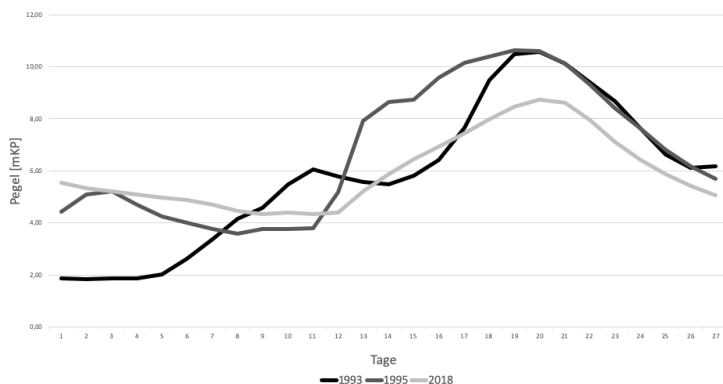


Abbildung 1: Verläufe historischer Hochwasserereignisse in Köln

Als System des mobilen Hochwasserschutzes wird innerhalb des Projekts die notwendige Lagerung, Logistik und Aufbau verbunden mit der Konfiguration des technischen Systems, in diesem Fall eines Dammbalkensystems, verstanden.

Um flexibel, sicher und angemessen auf ein anstehendes Hochwasserereignis reagieren zu können, soll mit Hilfe der Simulation eine optimale Systemkonfiguration gefunden werden, um auf dieser Basis eine Entscheidung zur operativen Prozessinitiierung zu treffen.

2 Potentiale der agentenbasierten Simulation im Hochwasserschutz

2.1 Die agentenbasierte Logistiksimulation

Mit Simulationsmodellen wird üblicherweise ein abstrahiertes Abbild relevanter Eigenschaften der Realität erstellt, um mit Hilfe von Experimenten das Verhalten des Systems auf verschiedene Parameter- und Einflussvariationen zu untersuchen. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen der Modellie-

rung, wie dem ereignisdiskreten oder dem System Dynamics Ansatz, bildet die agentenbasierte Modellierung das Zusammenspiel vieler unabhängiger Einheiten ab.

Als Agenten des Hochwasserschutzsystems kommen beispielsweise einzelne Gabelstapler im Lager, LKWs oder Aufbauteams in Frage. Während jeder Agent ein eigenes Regelwerk hat, müssen sie untereinander Absprachen treffen und interagieren, um das Gesamtziel zu erreichen (Mewes und Schuhmann 2019). Die Prozesse und Verhalten der Agenten beeinflussen sich wechselseitig, so dass z.B. Wartezeiten auf ein noch nicht anwesendes Aufbauteam den Aufbauprozess des mobilen Wandsystems verzögern.

Vorteil der agentenbasierten Modellierung ist es, dass Verhalten des Gesamtsystems gut auf sich ändernde Rahmenbedingungen untersuchen zu können. So kann entdeckt werden, dass der Einsatz eines weiteren LKWs keinen Vorteil mehr bringt, da sich nur zusätzliche Wartezeiten bei der Entladung an einer speziellen Hochwasserschutzmaßnahme ergeben. Auf diese Weise können verschiedene Szenarien simuliert werden, um eine optimale Konstellation zu finden.

2.2 Forschungsprojekt TopoOpt

Während die Vorteile der agentenbasierten Simulation in der Landwirtschaft bereits untersucht waren, bestand noch keine Anwendung im Hochwasserschutz. Innerhalb des landwirtschaftlichen Ernteprozesses geht es bspw. darum, dass Feld optimal zu mähen, die Ernteerträge abzutransportieren und am Ende des Prozesses im Silo einzulagern. Um hiermit verbundene Unsicherheiten zu umgehen, kann der Prozess vorteilhaft zur Planung, Kontrolle und Dokumentation simuliert werden (Steckel *et al.* 2013).

Im Forschungsprojekt TopoOpt wurden die Möglichkeiten aufgezeigt, die Abbildung der Logistik- und Aufbauprozesse im mobilen Hochwasserschutz ähnlich vorzunehmen. Wie in Abbildung 2 verdeutlicht, kann generell festgestellt werden, dass es sich um einen inversen Prozessablauf handelt. Während die Ernte durch die Prozessteilnehmer vom „Einsatzort“ Feld zum Silo verfahren wird, findet beim Hochwasserschutz ein Transport der mobilen Schutzelemente zum „Einsatzort“ Flusssufer statt.

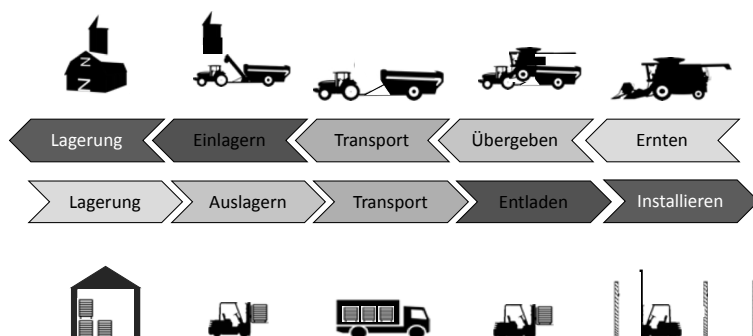


Abbildung 2: Prozessablauf in Landwirtschaft und Hochwasserschutz

Grundsätzlich zeigte das Forschungsprojekt auf, dass die Modellierung des Hochwasserschutzprozesses vorteilhaft genutzt werden kann. So kann der Logistik- und Aufbauprozess mittels der Simulation zur Hochwasservorhersage synchronisiert werden. Abläufe können demnach rechtzeitig und anforderungsbezogen ausgelöst werden.

Ein erster prototypischer Test der Simulation fand im Rahmen einer Hochwasserschutzübung in Köln statt.

3 Der mobile Hochwasserschutz der Stadt Köln

Die Stadt Köln ist in der Vergangenheit mehrfach von Hochwassern betroffen gewesen. Die letzten schweren Hochwasser des Rheins ereigneten sich in den Jahren 1993 und 1995 im Abstand von nur 13 Monaten (s.a. Abbildung 1). Sie gaben den Anstoß zur Einführung eines umfangreichen mobilen Wandsystems. Ein solches mobiles Wandsystem kann nur dann effektiv eingesetzt werden und den erforderlichen Schutz sicherstellen, wenn die für den Aufbau notwendigen Logistikprozesse entsprechend leistungsfähig ausgelegt sind.

3.1 Eckdaten des Hochwasserschutzes in Köln

Um den städtebaulichen Anforderungen Kölns Rechnung zu tragen, wurde in weiten Bereichen entlang des Rheins auf die Errichtung hoher feststehender Mauern zum Hochwasserschutz verzichtet, was einen entsprechend umfangreichen mobilen Schutz zur Folge hat, um die Schutzziele eines 100-

jährlichen, bzw. - im nördlichen Stadtgebiet - 200-jährlichen Hochwassers zu erreichen.

Der mobile Schutz von 10,7 km Länge verteilt sich auf 70 km Rheinufer. Installiert werden bei einem Vollaufbau in etwa 40.000 Dammbalken und 4.000 Stützen, die sich zu einer Schutzfläche von ca. 14.500 m² summieren.

Die eingesetzten Stützen messen von 0,30 m bis zu 4,20 m Höhe und sind mit einem „Poka Yoke“-Aufnahmesystem versehen, so dass jede Aufnahmeplatte einer Stütze spezifisch für genau einen Stützentyp ist. Dies verhindert einerseits den Einbau falscher Stützentypen, bedingt aber andererseits die punktgenaue Anlieferung des richtigen Stützentyps an die vorgesehene Einbaustelle.

Durch eine erhebliche Anzahl von Sonderlösungen ergeben sich ca. 70 verschiedene Stützentypen und über 80 verschiedene Dammbalkenlängen. Dies kombiniert mit der Tatsache, dass mit steigendem Pegel des Rheins bis zu acht Lagerstätten Material zu insgesamt 365 Aufbaumaßnahmen liefern müssen, zeigt in Grundzügen die Komplexität des Gesamtsystems mobiler Hochwasserschutz in Köln.

3.2 Ziele der Dynamisierung des Planungs- und Entscheidungsprozesses

Die zentrale Einflussgröße für die Abwicklung eines eintretenden Hochwassers ist die Steiggeschwindigkeit des Rheins, gemessen in Zentimeter pro Stunde. Sie bestimmt in entscheidendem Maße die logistischen Abläufe, da die vorgelagerten Transporte von den Lagerstätten zu den Aufbauorten und die darauffolgenden Aufbauprozesse der mobilen Elemente vor Erreichen des für die einzelne Maßnahme relevanten Pegels abgeschlossen sein müssen. Die Steiggeschwindigkeit des Rheins bestimmt also die erforderliche Geschwindigkeit des gesamten (logistischen) Ablaufs.

Vor der Entwicklung der Simulationslösung war die dem (logistischen) Prozess zugrundeliegende Steiggeschwindigkeit je nach Pegelhöhe mit 15 bzw. 10 cm/h fest vorgegeben. Es lag somit ein statisches Planszenario vor, bei dem der gesamte Logistik- und Aufbauprozess auf eine Prozessgeschwindigkeit fixiert war. Da aber, wie erwähnt, jedes Hochwasserereignis seine eigene Charakteristik besitzt, musste während jedes Hochwassereinsatzes durch Einzelfallentscheidungen der operativen Einsatzleitung eine Prozess-

anpassung auf Basis der Steiggeschwindigkeit durchgeführt werden, was zu Effizienzverlusten führte.

4 Ergebnisse der Umsetzung

4.1 Planungstool Hochwasserschutz

Mit dem Planungstool Hochwasserschutz (PLATHO) steht im Ergebnis ein Expertensystem zur Verfügung, mit dem dynamisch auf ein anstehendes Hochwasser mit seinen spezifischen Steiggeschwindigkeiten und Zwischenpegelständen reagiert werden kann. Den Ausgangspunkt einer Simulation stellt die Pegelvorhersage dar.

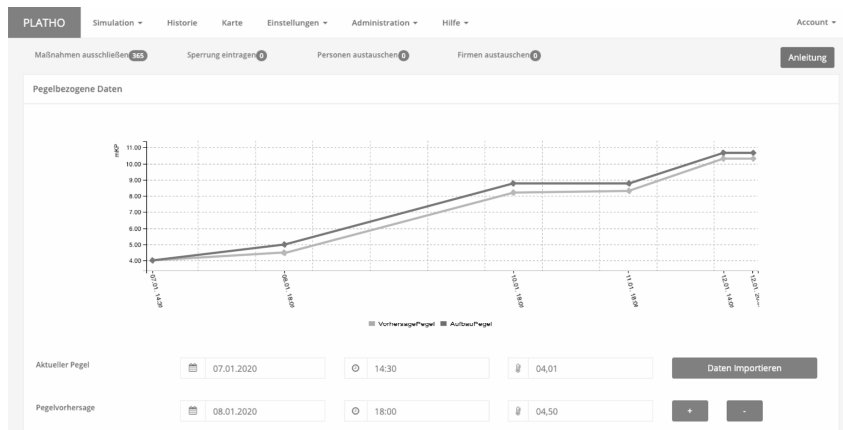


Abbildung 3: Eingabe des Vorhersage- und Aufbaupegels

Durch Daten-Import und manuelle Eingabe von Stützpunkten lassen sich Pegelverläufe anlegen. Hierbei wird zunächst die Vorhersage (untere Linie) angelegt und durch einen Aufbaupegel (obere Linie) ergänzt (siehe Abbildung 3).

Der Aufbaupegel stellt einen imaginären Pegel dar, nach dem sich der Aufbauprozess richtet. Durch ein zeitliches Vorziehen des Aufbaupegels kann Sicherheit in den Punkten Fertigstellungszeitpunkt und Aufbauhöhe gegenüber der aktuellen Vorhersage erreicht werden.

Weitere Einstellungen, wie Einsatzzeiten, -tage und zur Verfügung stehen des Einsetzequipment lassen den Simulationsraum, wenn notwendig, weiter einschränken und ermöglichen eine Kostenoptimierung.

Aufgrund der mit steigendem Zeithorizont zunehmenden Unsicherheit der Vorhersagen ermöglicht PLATHO es, nach Erstellung einer ersten „In-Advance“-Simulation, weitere „In-The-Meantime“-Simulationen auf die frühere Simulation aufzusetzen. Damit können sich im Einsatzverlauf verändernde Prognosen und Einsatzlagen abgebildet werden.

4.2 Dynamische Reaktion auf zu erwartenden Höchstpegel: Teilaufbau

Mittels Simulation werden alle möglichen Szenarien der Gefahrenabwehr ermittelt. Automatisch werden Hochwasserschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt, welche außerhalb der Pegelprognose liegen.

Das in Köln verbaute mobile System ermöglicht Teilaufbauten, d.h. die mobile Wand wird (entsprechend sichere Prognose vorausgesetzt) nicht bis zur vollen Höhe, sondern nur mit einem Teil der Dammbalken aufgebaut. Innerhalb von PLATHO wurden die Bereiche der mobilen Wand definiert, in denen ein solcher Teilaufbau besonders effizient umgesetzt werden kann. Die automatische Berücksichtigung des Teilaufbaus eine signifikante Erleichterung im Logistikprozess aufgrund reduziertem Transport- und Aufbauaufwand. Entsprechende Reporte mit den spezifischen auszuliefernden (Teil-)Mengen können hierzu für die Anweisung der externen Lagermitarbeiter generiert werden.

4.3 Dynamische Reaktion auf die Steiggeschwindigkeit: Einsatzmodalität

Einen wesentlichen Vorteil bietet die Synchronisation des Logistikprozesses mit der Steiggeschwindigkeit und somit dem Pegelverlauf. Sehr häufig treten Hochwasserverläufe mit einer relativ geringen Steiggeschwindigkeit auf. Steigt also der Rheinpegel langsamer als im derzeit vorliegenden Standard-szenario an, kann mit weniger Einsatzkräften und/oder längeren Aufbauzeiten operiert werden. Dies bietet die Möglichkeit, mit erheblich reduzierter Personalstärke und Geräteanzahl zu arbeiten und damit eine kosteneffiziente Auslastung sicherzustellen. Ebenso können natürlich sehr schnelle Pegelanstiege adäquat abgebildet und besser beherrscht werden.

Die Entscheidungsträger können auf Basis der notwendigen Zeitdauer, der Anzahl des Einsetzequipments sowie der potenziellen Kosten über die Auswahl eines Szenarios entscheiden. Die Abbildung 4 zeigt hierzu eine bei-

spielhafte Übersicht möglicher Szenarien. Die daran anschließende Detailanalyse ermöglicht eine genauere Betrachtung des ausgewählten Prozesses.

1 bis 5 von 5 Einträgen

09.07.2019	10.07.2019	11.07.2019	12.07.2019	13.07.2019	Aktive Arbeitszeit (in Stunden)	Gesamtzeit (in Stunden)	Kapazität LKW (Anzahl)	Kapazität SZ (Anzahl)	Kosten (in Euro)	Ergebnistyp	Ergebnisaktion
	14:4			10:20	92,3	92,3	13	2	####	wenigste LKW	Detailsicht
	06:06			10:20	76,9	76,9	21	2	####	eigene Auswahl	In Auswertung
	06:14			10:20	76,6	76,8	14	4	####	eigene Auswahl	Detailsicht
				10:20	60,3	60,3	20	4	####	niedrigste Kosten	Detailsicht
			02:07	10:20	56,9	56,9	28	6	####	kritischer Pfad	Detailsicht

Abbildung 4: Vorauswahl möglicher Logistik- und Aufbauszenarien

4.4 Transparente Datengrundlage als weiteres Ergebnis

Innerhalb des Entwicklungsprozesses wurde schnell klar, dass die notwendige umfangreiche Aufbereitung der in verschiedenen Quellen vorliegenden Daten die Chance bot, erstmalig alle Daten in einer Datenbank zusammenzuführen. Dadurch wurde als erheblicher Mehrwert für den Anwender eine zentrale digitale Datenbasis geschaffen.

In Zukunft muss so nur noch ein Datenbestand gepflegt werden. Hieraus lassen sich alle benötigten Informationen extrahieren und gezielt den Prozessteilnehmern zur Verfügung stellen. Redundantes Arbeiten und hierdurch möglicherweise entstehende Fehler werden so vermieden.

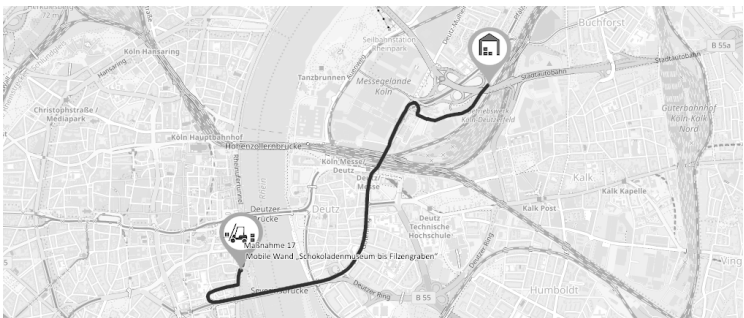


Abbildung 5: Anzeige einer Transportroute vom Lager zur Maßnahme

Die Abbildung 5 zeigt exemplarisch für den stark vereinfachten Informationsabruf die Anzeige einer Route vom Lager zur Hochwasserschutzmaßnahme. Weitere Informationen können bei Bedarf eingeblendet werden. Auch dies erhöht die Transparenz für die beteiligten Dienstleister.

4.5 Sicherheitsgewinn bei Entscheidungen

Durch die kurze Simulationsdauer sind die Entscheidungsträger in der Lage, vorab mehrere alternative Prozesskonstellationen zu prüfen, bevor eine Entscheidung getroffen wird. Diese Funktion ermöglicht es, Handlungsalternativen zu erzeugen, aus denen aufgrund des Erfahrungswissens der Beteiligten eine Alternative ausgewählt werden kann, die auch sicher durchführbar ist.

5 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Durch den Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis konnte eine Dynamisierung des Hochwasserschutz-Logistikprozesses erreicht werden. Hierdurch steht den Stadtentwässerungsbetrieben Köln ein derzeit weltweit einzigartiges Simulationstool zur Verfügung, welches in Zukunft eine verbesserte Reaktion auf Hochwasser ermöglichen soll. Das entwickelte agentenbasierte Simulationsmodell konnte hierfür in mehreren Übungen verifiziert und kalibriert werden. Eine Erprobung der Ergebnisse durch ein reales Hochwasser steht noch aus.

Zusammenfassend bietet die Simulation den Entscheidungsträgern eine stark verbesserte Entscheidungsgrundlage, ermöglicht die Dynamisierung und Synchronisation des Logistikprozesses mit einem anstehenden Hochwasser und vermindert durch die zusammengefasste Datenbasis Fehlerquellen.

In der Abbildung des Prozesses hat sich bestätigt, dass die Logistik frühzeitig in der Planung mobiler Systeme berücksichtigt werden muss. Dies fordert auch ein entsprechendes Merkblatt des BWK (2005). Aus Logistiksicht komplexitätstreibende Aufbauten und Sonderprozesse können so möglicherweise verhindert werden.

In Zukunft soll für eine Simulation im laufenden Prozess die Rückmeldung zum Arbeitsstand verbessert werden (Tracking). Auch bietet die geschaffene Datenbasis im Ausblick die Möglichkeit, den operativen Einsatzkräften

digitale einsatzspezifische Arbeitsanweisungen und tätigkeitsgebundene Informationen zur Verfügung zu stellen.

6 Literatur

- BWK (2005): Merkblatt. Mobile Hochwasserschutzsysteme. Grundlagen für Planung und Einsatz. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V.
- Mewes, B.; Schumann, A. (2019): Das Potential der Kombination von maschinellem Lernen und Agenten-basierter Methoden in der Wasserbewirtschaftung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 63. Jahrgang, Heft 6, Dezember 2019
- Steckel, T., Kersting, T. & Nüßer, W., (2013): Towards Supporting Mobile Business Processes in Non-deterministic Agricultural Environments by Using Agent-Based Technologies. KI - Künstliche Intelligenz: Vol. 27, No. 4. Springer. (S. 359-362).

Autoren:

Dipl.-Ing. Simon Jegelka

Dipl.-Kfm. Patrick Kluding

topocare GmbH
Gartenstraße 4
33332 Gütersloh

Stadtentwässerungsbetriebe Köln
Operativer Hochwasserschutz
Ostmerheimer Straße 555
51109 Köln

Tel.: +49 5241 50497 0
Fax: +49 5241 50497 99
E-Mail: s.jegelka@topocare.de

Tel.: +49 221-221-28693
Fax: +49 221-221-6628693
E-Mail: patrick.kluding@steb-koeln.de

Prof. Dr. Wilhelm Nüßer

Fachhochschule der Wirtschaft FHDW
Fachbereich Informatik
Fürstenallee 5
33102 Paderborn

Tel.: +49 5251 301 135
Fax: +49 5251 301 188
E-Mail: wilhelm.nuesser@fhdw.de

Digitale Methoden zur Projekt- und Geodatenverwaltung

Susanne Mehlhorn
Markus Moser
Stefan Janu

Die österreichische Wildbach- und Lawinenverbauung hat bereits sehr früh beginnen können ihre Arbeitsabläufe und Arbeitsgrundlagen zu digitalisieren. Damit nimmt sie im österreichischen Bundesdienst eine Vorreiterrolle ein. Die drei zentralen Applikationen sollen hier veranschaulicht werden.

Ein zentrales Element im Tagesgeschäft ist das sogenannte Projektverwaltungsmodul (PVM). Im Rahmen dieser Online-Datenbank werden alle Schritte abgebildet, die Projekte für Schutzmaßnahmen durchlaufen müssen.

Ein weiteres über viele Jahre gewachsenes Herzstück ist der digitale Wildbach- und Lawinenkataster (WLK). In dieser GIS- und Oracle-Datenbank werden österreichweit alle Geodaten des Dienstzweigs erhoben und gewartet. Diese umfassen sämtliche Wildbacheinzugsgebiete und Gewässerläufe, Lawineneinzugsgebiete, Gefahrenzonen, Bauwerke bis hin zu Einzelgutachten. Auch wurden besondere Anstrengungen unternommen, die Inhalte des WLK über browser- und betriebssystemübergreifende webbasierende open-source Anwendungen auch mobil auf allen Endgeräten zugänglich und abfragbar zu machen.

Ähnliche Anstrengungen wurden für die Gemeinden und andere Interessenten zur Einsicht in die wesentlichen Inhalte des WLK, insbesondere der Gefahrenzonenpläne unternommen. Hierfür wurde ein Online-Gemeindeportal eingerichtet, womit allen Gemeinden ihre Geodaten aus dem WLK sehr einfach zur Verfügung gestellt werden und jederzeit als Shapefiles heruntergeladen werden können. Des Weiteren wird das Portal nun auch für Eingaben durch die Gemeinden selbst geöffnet. Diese können hier die Laufende Überwachung der Schutzbauwerke direkt durchführen und Ereignisse eingeben.

Das Gemeindeportal wird derzeit in den Portalverbund des Bundes integriert und ist für den Verwaltungspreis des Bundes nominiert.

Stichworte: Digitale Methoden, Wildbachverbauung, Geodaten, Management, Projektverwaltung

1 Einführung

Die österreichische Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) hat bereits sehr früh beginnen können ihre Arbeitsabläufe und Arbeitsgrundlagen zu digitalisieren. Damit nimmt sie im österreichischen Bundesdienst eine Vorreiterrolle ein. Die zentralen Applikationen sollen hier vorgestellt werden.

2 Projektabwicklung

Eine zentrale Rolle im Tätigkeitsbereich der WLV spielt das Förderungsmanagement. Die wichtigsten Aufgaben sind:

- 3 Investitionen in Maßnahmen zum Schutz vor Naturgefahren
- 3 Beratung der Interessenten bei der Vorbereitung für Förderprojekte
- 3 Prioritätenreihung der zur Förderung beantragten Schutzvorhaben
- 3 Abwicklung genehmigter Förderprojekte für Interessenten
- 3 Finanzierung der Projekte auf der Grundlage von Jahresarbeitsprogrammen
- 3 Planung und Koordinierung des Einsatzes der Fördermittel in Kooperation mit den Finanzierungspartnern (Länder, Interessenten)
- 3 Abrechnung und Verwendungsnachweis investierter Förderungsmittel
- 3 Kollaudierung der öffentlichen Fördermittel

Für die effiziente Abwicklung genannter Aufgaben bildet das sogenannte Projektverwaltungsmodul (PVM) ein zentrales Element im Tagesgeschäft. Dieses wurde seit seiner Einführung 2009 beständig weiterentwickelt. Im Rahmen dieser Online-Datenbank können alle Schritte standardisiert abgebildet werden, die Planungen und Projekte für Schutzmaßnahmen durchlaufen müssen.

Basis für die implementierten Funktionen und Abläufe ist die Verwaltungsanweisung zur *Technischen Richtlinie* für die Wildbach- und Lawinenverbauung (2019).

Das PVM dokumentiert und verwaltet somit alle Projektobjekte, Prioritätenreihungen, Vorstudien, Projektierungen, Projekte, Sofortmaßnahmen, Betreuungsdienste, Kostenerhöhungen und Projektänderungen, Mittelfreigaben, Jahresarbeitsprogramme, Durchführungsanträge und Kollaudierungen.

Es werden somit von der Erstellung einer Vorstudie über die verschiedenen Genehmigungsschritte, die finanzielle Entwicklung des Projekts bis zur Übergabe der Bauwerke an die Gemeinde nach Projektende alle Phasen eines Projektes abgearbeitet. Der Status jedes Projekts ist dabei jederzeit einsehbar

Die rechtsrelevanten Genehmigungskreisläufe des früher analogen Aktenlaufes werden ebenso abgebildet, wie die prozessorientierte serielle Abfolge der einzelnen Verwaltungsagenden. Hierfür ist ein komplexes Rechte- und Rollenmanagement hinterlegt.

Weiters sind hier alle Projektunterlagen digital abgelegt und mithilfe eines umfangreichen Abfragemanagers und definierten Abfrageoptionen ist die Generierung von Kennzahlen, Statistiken und Statusübersichten für Berichte und politische Anfragen auf Knopfdruck möglich. Die vielfältigen Auswertungen dieser Daten münden unter anderem in jährlichen Veröffentlichungen des Dienstzweiges.

3 Digitale Daten

3.1 Wildbach- und Lawinenkataster (WLK)

Die intensive Auseinandersetzung mit dem Naturraum und die gesetzliche Verpflichtung zur Führung eines Wildbach- und Lawinenkatasters bedingen, dass die WLK eine Fülle an Geodaten und projektbezogenen Daten sammelt, erstellt und bearbeitet. Diese Daten werden auch für die Naturgefahreninformation benötigt, die einen großen Arbeitsschwerpunkt darstellt.

Der digitale Wildbach- und Lawinenkataster (WLK) der Wildbach- und Lawinverbauung ist ein weiteres, seit 2006 gewachsenes Herzstück des Dienstzweigs. In dieser Datenbank werden österreichweit alle Geodaten und zugehörige Informationen erhoben und gewartet. Der WLK ist ein modular aufgebautes GIS- und Datenbanksystem. Erfasst werden sämtliche Wildbacheinzugsgebiete und Gewässerläufe, Lawineneinzugsgebiete, Steinschlag- und Rutschungsgebiete, Gefahrenzonen und Gefährdungsbereiche, Kenn- und Lagedaten der errichteten Schutzbauwerke bis hin zu Einzelgutachten.

Die einzelnen Module gliedern sich wie folgt:

- 3 Basisdaten (österreichweit verfügbare Grundlagendaten externer Institutionen, wie Geologie, Landnutzung, Klima)
- 3 Bauwerke (Kenn- und Lagedaten aller Schutzbauwerke)
- 3 Gefahrenzonenplan (Funktionen für Erstellung bis Plandruck)

- 3 Gutachten (kategorisierte Ablage und Verortung von Gutachten)
- 3 Einzugsgebiete (Digitalisierung und Stammdaten für Wildbäche, Lawinen, Steinschlag- und Rutschungsgebiete im Kompetenzbereich)
- 3 Ereigniskataster (Verortung und Dokumentation von (Schad-) Ereignissen)
- 3 Sedimentmanagement (Planungstool für angefallenes Räumgut nach Ereignissen)
- 3 Datenexport für eine weitere interne Verwendung

Um eine Vergleichbarkeit der Datenqualität sicherzustellen, erfolgen innerhalb dieser Module sämtliche Dateneingaben und Digitalisierungen standardisiert mithilfe von definierten Workflows.

Der Wildbach- und Lawinenkataster hilft dadurch die Arbeitsabläufe in der WLV zu koordinieren und bildet die Basis für alle digitalen Planungsaufgaben. Beispielsweise können fast alle Arbeitsschritte von der Grundlagenerhebung bis zum Plandruck eines Gefahrenzonenplans nunmehr innerhalb dieses Systems erfolgen (Abbildung 1).

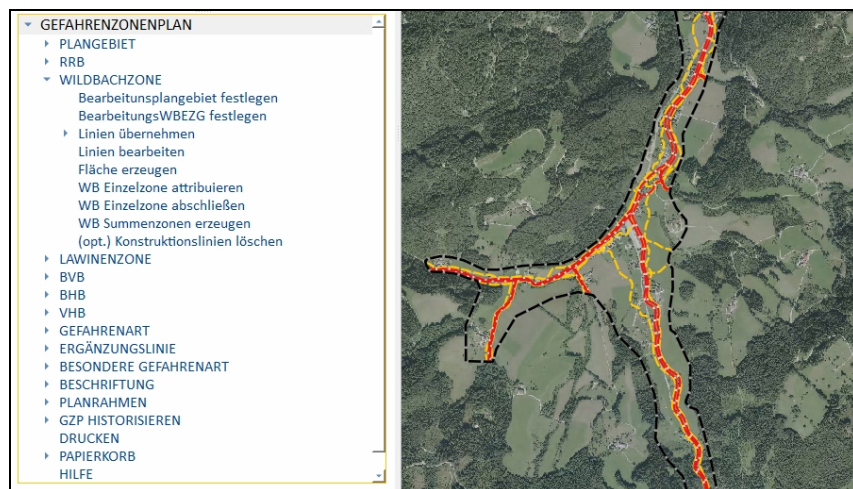


Abbildung 1: Modul und Workflow für die Erstellung eines Gefahrenzonenplans im digitalen Wildbach- und Lawinenkataster

Der WLK ist derzeit auf 27 Servern in ganz Österreich installiert. Der zentrale Server befindet sich in Wien. Der Datenabgleich (Replikation) zwischen den Servern findet täglich in der Nacht statt.

Als Basissoftware diente eine Oracle-Datenbank und ESRI ArcGIS for Desktop. Im Zuge der rasanten technischen Entwicklungen konnte dieses etwas schwerfällige gewordene Mutterschiff auf open-source umgestellt und vitalisiert werden. Dies erfolgte zum einen durch eine Umstellung von Arc-Map auf QGis und durch eine derzeitige Umstellung der Oracle-Datenbank auf Postgres.

3.2 WLK- Abfragemanager

Basierend auf der konstanten Dateneingabe der letzten Jahre, wurden in letzter Zeit besondere Anstrengungen unternommen diesen Datenschatz auch schneller aufruf- und abfragbar zu machen. Ziel war und ist es, die Inhalte des WLK über browser- und betriebssystemübergreifende webba- sierende open-source Anwendungen auch mobil auf allen Endgeräten für die Mitarbeiter*innen zugänglich zu machen.

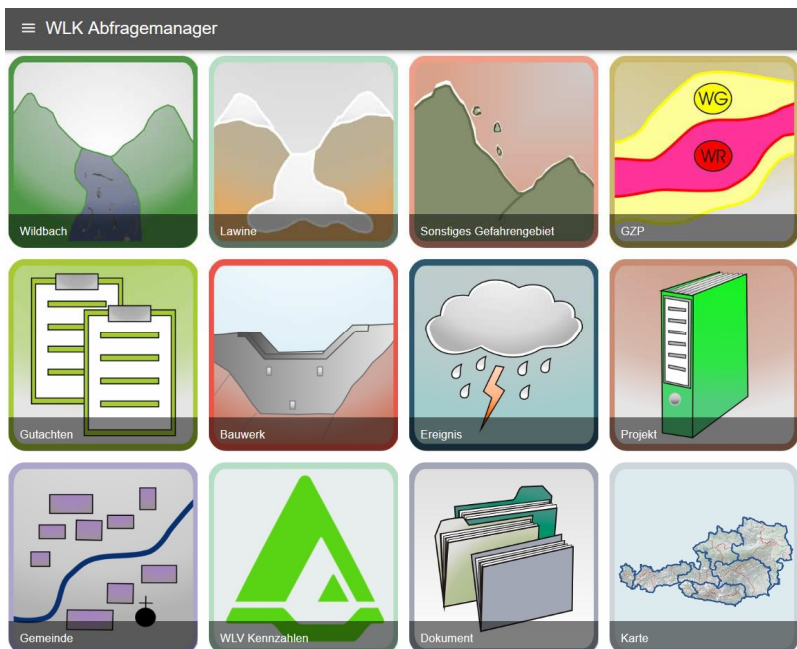


Abbildung 2: Oberfläche und Module des WLK-Abfragemanagers

Die gesamte Datenmenge mit rund 500.000 Daten soll somit online verfügbar und sämtliche Informationen jederzeit schnell abfragbar sein. Umgesetzt wurden diese Anforderungen in Form des WLK-Abfragemanagers.

Der WLK-Abfragemanager ist eine Browser-Anwendung, die zur Nutzung aller Inhalte einer Autorisierung bedarf. Er funktioniert auf allen gängigen Betriebssystemen (Apple-iOS, Android, Windows), baut auf einer Open Source Suchmaschinen-Datenbank auf und ist in einem zeitgemäßen Design umgesetzt. Der Abfragemanager ist ein Web-basiertes Abfragewerkzeug, mit dem die Daten aller WLK-Module gegliedert nach verschiedenen sachlichen und räumlichen Abfragekategorien analysiert und dargestellt werden können (siehe Abbildung 2).

Im Zuge der weiteren Entwicklungen ist geplant dieses Tool zusätzlich zu den Abfrage- und Darstellungsmöglichkeiten immer mehr auch für direkte Dateneingaben zu öffnen.

4 Daten für Gemeinden und externe Institutionen

Ähnliche Anstrengungen wurden für die Gemeinden und andere Interessenten zur Einsicht in die wesentlichen Inhalte des WLK, insbesondere der Gefahrenzonenpläne unternommen. Diese Informationen müssen im Sinne der geltenden Rechtslage und aufgrund der wirtschaftlichen Interessen der Betroffenen, für die Gemeinden und Körperschaften öffentlichen Rechts (Wasserverbände, Gemeindeverbände, Genossenschaften) zugänglich sein. Um diese Informationen zielgruppengerecht und attraktiv zur Verfügung zu stellen, wurde ein Online-Portal eingerichtet.

In diesem Portal sind alle 2.100 Gemeinden Österreichs angelegt. Die Authentifizierung läuft über die Gemeinde-Mailadresse (Gemeindepostfach). An diese wird ein Link per Mail versendet und ermöglicht den direkten Einstieg ins sogenannte Gemeindeportal.

Die Einstiegsseite zeigt immer die aktuellste Oberfläche und Datenlage, zusammengestellt für das jeweilige Gemeindegebiet. Innerhalb der einzelnen Menüpunkte befinden sich die gesamten freigegebenen Detailinhalte, welche beliebig nach allen abfragbaren Merkmalen selektiert und als Excel-Tabelle exportiert werden können. Die Inhalte können auf verschiedenen Kartenhintergründen dargestellt und exportiert oder ausgedruckt werden. Ein Export der Geodaten als Shapefiles für eine weitere GIS-Verwendung ist ebenfalls angeboten.

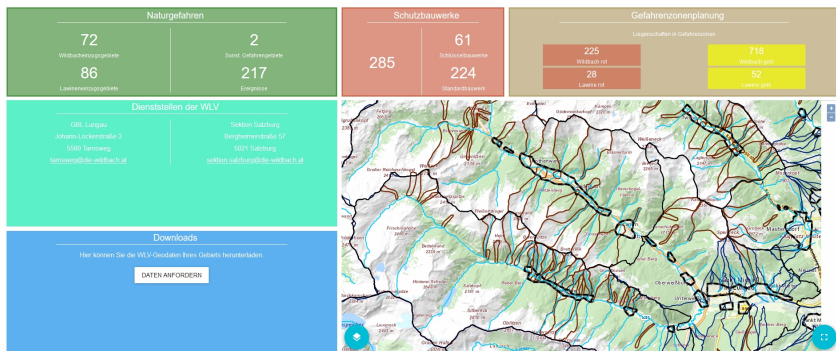


Abbildung 3: Einstiegs-Oberfläche des WLW-Gemeindeportals

Des Weiteren wurde das Portal nun auch für Eingaben durch die Gemeinden selbst geöffnet und vereinfacht somit die Erfüllung ihrer Erhaltungs- und Überwachungsaufgaben. So können die Aufnahmen und Bewertungen im Zuge der laufenden Überwachung der Schutzbauwerke im Gemeindegebiet direkt online, vor Ort durchgeführt und auch Ereignisse eingegeben werden. Auf mobilen Geräten kann eine Verortung des aktuellen Standorts per GPS erfolgen. Die direkte Verknüpfung von aufgenommenen Fotos ist ebenfalls möglich.

Die Verwendung ist für die Gemeinde mit keinerlei Kosten verbunden und denkbar einfach. Als reine Web-Anwendung erfolgt die Aktualisierung unbemerkt im Hintergrund.

Ein Zugang für weitere Interessenten und Partner, wie Universitäten, Forschungseinrichtungen oder Infrastrukturbetreiber kann ebenfalls unkompliziert eingerichtet und somit der bisher erforderliche manuelle Datenexport umgangen werden. Dies stellt eine enorme Arbeitserleichterung dar, da Datenanfragen von extern fast jeden Tag eingehen.

Um den Einstieg noch weiter zu vereinfachen, wird das Gemeindeportal derzeit in den Portalverbund des Bundes integriert. Im Jahr 2019 war es für den Österreichischen Verwaltungspreis des Bundes nominiert.

5 Literatur

- BMLFUW (Hrsg.) (2018): Richtlinie für den Wildbach- und Lawinenkataster (WLK-RL)
- BMNT (Hrsg.) (2019): Technische Richtlinie für die Wildbach- und Lawinenverbauung
- BMNT (Hrsg.) (2019): Verwaltungsanweisung zur Technischen Richtlinie für die Wildbach- und Lawinenverbauung
- Lowatschek G., Amberger C., Ortner G., Pedarnig N. (2016): Die digitale Welt der Wildbach- und Lawinenverbauung, Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen, Erosions- und Steinschlagschutz, Heft Nr. 178
- ON-Institut (Hrsg.) (2009): ONR-24800 - Schutzbauwerke der Wildbachverbauung — Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung

Autoren:

Dipl.Geogr. Susanne Mehlhorn
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Sektion Wien, NÖ und Bgld.
Marxergasse 2
1030 Wien
susanne.mehlhorn@die-wildbach.at

DI Markus Moser
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Lungau
Johann Löcker Str. 3
5580 Tamsweg
markus.moser@die-wildbach.at

DI Stefan Janu
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Steiermark Nord
Schönaustraße 50
8940 Liezen
stefan.janu@die-wildbach.at

Einsatz eines digitalen Informationssystems für das kommunale Hochwasserrisikomanagement

Stefan Quoika
Joachim Wald

Hochwasserschutz als wichtige kommunale Aufgabe kann nicht allein durch technische Maßnahmen erreicht werden. Daher ist es wichtig, dass Kommunen ein Hochwassermanagement für den vorsorgenden Hochwasserschutz aufbauen. Die Kombination von Hochwasseralarm- und Einsatzplänen mit einem digitalen Fachinformationssystem ist hierfür gut geeignet. In Baden-Württemberg wird dazu FLIWAS 3 eingesetzt. Anhand eines Praxisbeispiels wird die Anwendung von FLIWAS 3 aufgezeigt.

Stichworte: Hochwasserschutz, Hochwassermanagement, FLIWAS 3

1 Kommunales Hochwasserrisikomanagement

Hochwasserschutz ist eine wichtige kommunale Aufgabe. Dies kann nicht allein durch technische Hochwasserschutzmaßnahmen erreicht werden. Deshalb ist es wichtig, dass Kommunen sich mit dem Hochwasserrisiko auseinandersetzen und gezielt ein Hochwassermanagementinstrument für den vorsorgenden Hochwasserschutz aufbauen.

Kommunale Hochwasseralarm- und Einsatzpläne (HWAEP) sind dabei ein wichtiger Bestandteil.

Bei Hochwasser sind seitens der Kommune zum Schutz der Bürger und von Stadtgebieten eine Vielzahl von Lageinformationen zu bewerten und Alarmierungen vorzunehmen, die Einsatzkräfte einzuteilen sowie Entscheidungen über Maßnahmen an kritischen Objekten zu treffen.

Bei der Erstellung von HWAEP werden örtlich relevante Informationen mit der Kommune und den beteiligten Organisationen zusammengestellt. Schwerpunkte der inhaltlichen Arbeit liegen in der Definition von Schutzziele, der Identifikation von kritischen Objekten und der Festlegung geeigneter Schutzmaßnahmen.

2 Flutinformations- und Warnsystem FLIWAS 3

Die im Rahmen des HWAEP ermittelten Informationen und festgelegten Schutzmaßnahmen können in ein webbasiertes Flutinformations- und Warnsystem integriert werden. In Baden-Württemberg wird hierfür FLIWAS 3 eingesetzt. FLIWAS 3 ist ein Fachsystem für Informationsbereitstellung und Kommunikation im Hochwasserkrisenmanagement.

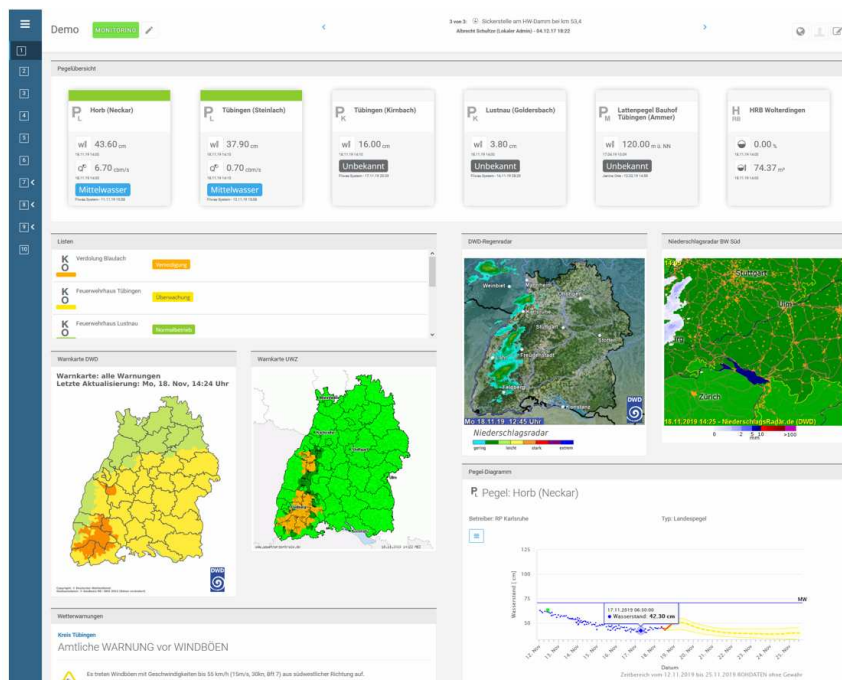


Abbildung 1: Darstellung des FLIWAS 3 Cockpits (Quelle: <https://infoportal.fliwas3.de>)

Mit Hilfe von FLIWAS 3 kann innerhalb der Kommune online ein zentraler Informationsaustausch sowohl von landesweit als auch lokal verfügbaren hochwasserrelevanten Daten erfolgen. Dabei können Daten aus dem breiten Angebot an Mess- und Prognosewerten von Landespegeln, Wetter- und Hochwasserwarnungen, Statusmeldungen technischer Hochwasserschutzanlagen und kommunalen Pegeldaten sowie Lageinformationen benachbarter Kommunen bereitgestellt werden (siehe Abbildung 1).

Die Konfiguration von FLIWAS 3 erfolgt individuell für die Kommune. Die Nutzung kann über unterschiedliche Endgeräte sowohl stationär im Einsatzstab als auch mobil, z.B. mittels Smartphone, erfolgen.

3 Praxisbeispiel Gemeinde Rheinmünster

Anhand der Gemeinde Rheinmünster kann die Erstellung des HWAEP sowie die Anwendung des digitalen Informationssystems FLIWAS 3 beispielhaft aufgezeigt werden.

Die Gemeinde Rheinmünster umfasst 5 Ortsteile und liegt am Oberrhein westlich von Baden-Baden. Hochwassergefährdungen können hier sowohl durch den Rhein als auch durch mehrere Nebengewässer des Rheins aus der Vorbergzone des Schwarzwalds entstehen. Im Bereich von Rheinmünster liegen der Rheinpolder Söllingen/Greffern mit einem Retentionsvolumen von etwa 12 Mio m³ sowie die Hochwasserrückhaltebecken Abtsmoor und Hägenich mit jeweils 2,2 Mio m³ Retentionsvolumen an den Nebengewässern.

Zusammen mit der Gemeinde wurde von WALD + CORBE das fachliche Konzept zum HWAEP erarbeitet.

Schwerpunkte der inhaltlichen Arbeit liegen bei der Identifikation von kritischen Objekten sowie der Zuordnung konkreter Schutzmaßnahmen zu den vier Alarmstufen (Monitoring, Warnphase, Kontrollphase und Abwehrphase) unter Berücksichtigung lokaler Indikatoren.

Den vier Alarmstufen wurden Auslöseschwellen von lokalen Pegeln oder Wetterwarnungen zugeordnet. Für die einzelnen Alarmstufen wurden Maßnahmen und Handlungsanweisungen mit eindeutigen Formulierungen der Aufträge und entsprechender Priorisierung zusammengestellt. Die Maßnahmen wurden mit der Kommune und den örtlichen Akteuren (Verwaltungsbereiche, Bauhof, Feuerwehr, Landratsamt usw.) festgelegt. Dabei

wurden mögliche Gefährdungen durch den Rhein mit Einsatz des Polders Söllingen/Greffern und durch die Nebengewässer als unterschiedlichen Einsatzszenarien definiert.

Der HWAEP bildet die fachliche Grundlage für die Einführung des Informationssystems FLI WAS 3 in Rheinmünster.

Dabei wurden die planbaren wasserwirtschaftlichen Maßnahmen aus dem HWAEP der Gemeinde als Maßnahmenplan in FLI WAS hinterlegt und die Inhalte von FLI WAS 3 auf den Bedarf der Gemeinde angepasst. Die FLI WAS-Karte für Rheinmünster zeigt Hochwasserschutzsysteme, Pegelstellen sowie virtuelle Niederschlagsschreiber (siehe Abbildung 2).

Im Hochwasserfall stehen somit wichtige Informationen zur Wetterlage, zu Niederschlagsdaten und Pegelständen sowie zu Füllständen von Hochwasserrückhaltebecken und dem Gefährdungszustand von kritischen Objekten für die Beteiligten zentral zur Verfügung.

Dabei ist eine einfache und schnelle Kommunikation von „Erkundern“ und Einsatzkräften vor Ort mit der Einsatzleitung durch den Austausch von Lagemeldungen möglich.



Abbildung 2: Übersichtslageplan Gemeinde Rheinmünster (Quelle: FLI WAS 3)

Im Rahmen von Katastrophenschutzübungen mit FLIWAS 3 kann die Koordination der einzelnen Einsatzkräfte sowie des Einsatzstabes getestet werden und so neue Erkenntnisse für die Fortschreibung des HWAEP gewonnen werden.

Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Quoika

Dipl.-Ing. Joachim Wald

WALD + CORBE Consulting GmbH
Am Hecklehamm 18
76549 Hügelsheim

WALD + CORBE Consulting GmbH
Am Hecklehamm 18
76549 Hügelsheim

Tel.: +49 7229 1876-119
Fax: +49 7229 1876-777
E-Mail: s.quoika@wald-corbe.de

Tel.: +49 7229 1876-100
Fax: +49 7229 1876-777
E-Mail: j.wald@wald-corbe.de

Entwicklung eines Abstautools für das Entscheidungshilfesystem der Staurationsteuerung an der österreichischen Drau

Oliver Buchholz, Ulrich Haberl,
Simon Frey, Maarten Smoorenburg,
Bernhard Becker, Simone Patzke, Hendrik Burkamp

An der Drau in Österreich wurde von VERBUND Trading GmbH für die Staustufenkette der VERBUND Hydro Power ein vorhersagebasiertes, optimiertes Decision Support System implementiert, das Ziele der Gewässerökologie, des Hochwasserschutzes und der Energieerzeugung gleichermaßen verfolgt. Die Umsetzung erfolgte mit RTC-Tools 2 unter dem Delft-FEWS Vorhersagesystem PROVIS. Neben dem Abstau nach Wehrbetriebsordnung umfasst die Anwendung auch den Wiederaufstau nach Ereignissen.

Stichworte: RTC-Tools 2, Vorhersagebasierte Optimierung, Hochwasserschutz, Delft-FEWS

1 Projektgrundlagen

Die VERBUND Hydro Power GmbH (VHP) betreibt an der Drau, von Paternion bis zur Grenze zu Slowenien, eine Staustufenkette mit zehn Kraftwerken auf einer Strecke von ca. 150 km. Bei der Energieerzeugung sind Vorgaben des Hochwasserschutzes und der Gewässerökologie einzuhalten - eine Optimierungsaufgabe unter konkurrierenden Zielen.

Der Gebirgsfluss Drau besitzt ein steiles Einzugsgebiet mit schnell reagierendem Abflussverhalten und sehr geringen Reaktionszeiten bei Hochwasser.

Wesentliches Element des Hochwasserschutzes an der Drau ist die Vorabsenkung des Wasserspiegels in den Staustufen, um eine Hochwasserwelle

aufzunehmen und zu dämpfen. Der Abstau an der Drau sollte unter Beachtung aller Sicherheitsaspekte und Rahmenbedingungen möglichst spät und gleichmäßig erfolgen, um die Fischhabitate in den Speicherseen so wenig wie möglich zu beeinträchtigen. Dabei darf der Abstau an sich keine Hochwasserwelle auslösen und darf sich nicht mit der prognostizierten Hochwasserwelle überlagern.

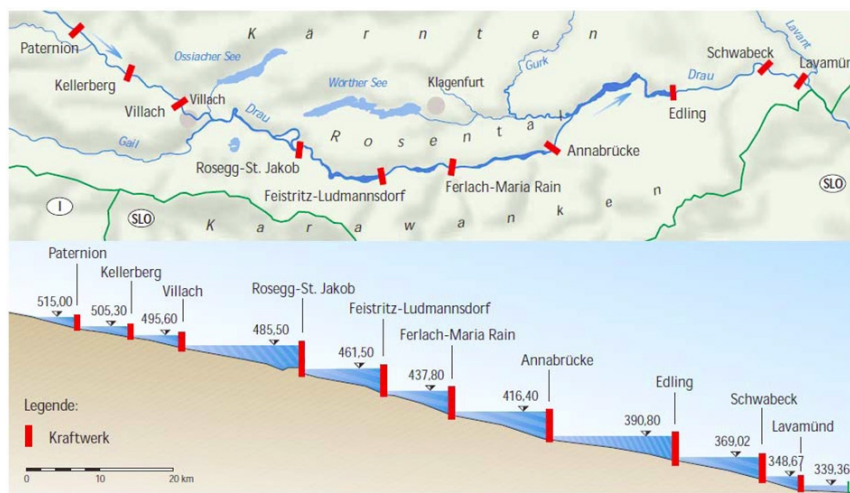


Abbildung 1: Staukette der Drau (Grafik: VERBUND)

Die Abstauregelung ist in der Wehrbetriebsordnung (WBO 2014) festgelegt. Die Absenkung wird durch die Zufluss-Prognosen für das Kraftwerk (KW) Rosegg-St. Jakob sowie für das KW Edling ausgelöst. Dabei werden auch laterale Zuflüsse zur KW-Kette erfasst. Randbedingungen für eine optimierte Vorabsenkung ergeben sich aus der WBO wie folgt:

- Max. Absenkgeschwindigkeit von 0,30 m/h
- Absenkziele in Abhängigkeit der prognostizierten Durchflüsse,
- Der gesteuerte HW-Abfluss darf in Lavamünd nicht höher sein als das natürliche Hochwasserereignis in Lavamünd.

Auf Grund der Prognoseunsicherheiten werden noch folgende vom Nutzer variabel gestaltbare Ziele definiert:

- Beendigung der Absenkung 12 h vor Eintritt des maximalen Prognose-scheitels in Edling

- Beginn des Wiederaufstaus frühestens 6 Stunden nach Erreichen der maximalen Absenkung
- Möglichst Minimierung des HW-Abflusses durch Staustufensteuerung auf 1.500 m³/s in Lavamünd.

Für die Beurteilung der Hochwassersituation an der Drau-Staukette setzen die Mitarbeiter von VERBUND das System PROVIS und das darin integrierte Abstau-Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung ein. PROVIS basiert auf einem operationellen Delft-FEWS-Vorhersagesystem (Werner et al. 2013), das als Datenintegrations- und Simulationsschale alle operationellen Prozesse automatisiert durchführt. Prognosezuflüsse auf Basis numerischer Wettervorhersagemodelle (INCA, ECMWF, ALARO, AROME, RACE, GEM und GFS) werden mit dem hydrologischen Modell COSERO kontinuierlich berechnet. Veränderliche Größen (Wasserstand W, Abfluss Q) und Betriebszustände in den Staustufen, an den Wehranlagen und Turbinen werden kontinuierlich gemessen.

2 Abstau-Werkzeug

Das Abstau-Werkzeug wurde 2018 auf Basis von RTC-Tools 2 (Schwanenberg et al. 2015) entwickelt und befindet sich seitdem erfolgreich für den Abstau im Einsatz. Die vorhersagebasierte Optimierung unter RTC Tools 2 liefert simulierte W- und Q-Werte für alle sieben optimierten Speicher passend zum gewählten Abstauszenario und gibt damit eine Abstauempfehlung. Der anschließende Wiederaufstau und der dadurch erreichbare HW-Schutzes in Lavamünd ist Gegenstand der aktuellen Entwicklungen und befindet sich in der Testphase.

RTC-Tools 2 ist eine Open Source Toolbox zur vorhersagebasierten Steuerung und Optimierung von hydraulischen Systemen unter konkurrierenden Zielgrößen. Bei der mathematischen Implementierung wurde Wert auf stabile, konsistente und konvergierende Lösungen gelegt. RTC-Tools bietet verschiedene Möglichkeiten zur Berücksichtigung von nichtlinearen Zusammenhängen. Die Modellstruktur des hydraulischen Systems wird über ein Ersatzsystem in der Programmiersprache Modelica abgebildet und parametrisiert. Die Beschreibung des Optimierungsproblems selbst, also die Definition der Zielvariablen und Zielfunktion sowie die Priorisierung der

Zielvereinbarungen erfolgen in einem Python-Skript. Auch der Aufruf des RTC-Tools 2 Packages und des eigentlichen Solvers erfolgen über Python.

Die Staustufen werden im System über eine Volumen-Wasserstands-Beziehung mit minimalen und maximalen Speicherfüllständen parametrisiert.

Es wurden sechs Zielfunktionen implementiert, wobei die Reihung der Ziele ihre Priorität angibt. Sind Ziele auf einer Prioritätsstufe definiert, können zur weiteren Differenzierung Gewichte verteilt werden.

- Z1: Bis zum Zeitpunkt 6 Stunden nach „Ende Abstau“ darf der WSP nur sinken oder gehalten werden, danach darf wieder aufgestaut werden.
- Z2: Für Lavamünd gilt: Der gesteuerte Abfluss darf nicht größer als das Minimum vom natürlichen HW-Abfluss oder 1.500 m³/s sein und für den Wiederaufstau nicht geringer als die Turbinenkapazität.
- Z3: Bis zum „Ende Abstau“ darf der WSP sich zwischen dem letzten Messwert und dem Absenkeziel bewegen. Bis Anfang Wiederaufstau wird das Absenkeziel gehalten, danach Aufstau bis zum Stauziel.
- Z4: Begrenzung der Absenkegeschwindigkeit auf 30 cm pro Stunde für alle Speicher bis zum Ende der Simulation.
- Z5.1: Der Abstau soll möglichst spät beginnen, der Wiederaufstau soll möglichst früh starten. (25% Gewichtung)
- Z5.2: Die Turbinenkapazität soll möglichst gut ausgenutzt werden. (75% Gewichtung)

Die Ziele unterteilen den Prognosezeitraum in drei Phasen:

1. Beginn der Prognose bis zwölf Stunden vor dem Hochwasserscheitel. Zu diesem Zeitpunkt – „Ende Abstau“ genannt – muss der Zielwasserstand Absenkeziel erreicht sein. Die Länge des Zeitraums bis zum „Ende Abstau“ kann vom Anwender manuell übersteuert werden.
2. „Ende Abstau“ plus sechs Stunden. So lange muss das Absenkeziel mindestens gehalten werden. Die Länge des Zeitraums bis zum „Anfang Wiederaufstau“ kann vom Anwender ebenfalls manuell übersteuert werden.
3. „Anfang Wiederaufstau“ bis Ende der Prognose. Während dieses Zeitraums möglichst das maximale Stauziel zu erreichen und der Abfluss in Lavamünd unter 1.500m³/s zu halten.

Das erste Optimierungsziel gibt vor, dass die Absenkgeschwindigkeit in Phase 1 und 2 kleiner als Null sein muss. In Kombination mit Ziel 4 bedeutet das, dass vor Phase 3 nur eine Absenkung bis -0,3 m/h stattfinden darf und der Wasserpegel nicht steigen kann. Danach werden auch positive Absenkgeschwindigkeiten erlaubt, der Wiederaufstau kann beginnen.

Im zweiten Optimierungsziel werden Aspekte des Hochwasserschutzes und des Naturschutzes formuliert. Hier wird zunächst der maximale Abfluss des natürlichen Hochwassers in der Drau ermittelt. Dieser Abfluss darf durch Steuereinflüsse nicht erhöht werden. Darauf folgt eine Abfrage, die das Minimum aus diesem Wert und den nicht zu überschreitenden 1.500 m³/s bildet und dieses als Obergrenze für die Abgabe aus dem letzten Kraftwerk Lavamünd vorgibt. Zuletzt wird für Phase 3 eine minimale Abgabe in Lavamünd definiert, die der Turbinenkapazität des Kraftwerks entspricht. Damit soll sichergestellt werden, dass ein zu schneller Wiederaufstau die Drau unterhalb der Kraftwerkskette nicht temporär trockenlegen kann.

Die Vorgabe, auf welche Wasserstände gesteuert werden, d.h. was das Abstau-Werkzeug letztendlich anstrebt, wird in den Zielen 3 und 5.1 formuliert. Für die einzelnen Phasen ergeben sich die Wasserstände wie folgt:

1. Hier wird zunächst der letzte Messwert des Oberwassers des jeweiligen Kraftwerks bis zum Zeitpunkt „Ende Abstau“ konstant extrapoliert.
2. Danach wird das Absenkziel laut Wehrbetriebsordnung vorgegeben.
3. Zuletzt wird das Stauziel für den normalen Betrieb der Kraftwerke vorgegeben.

Damit wird dem Abstau-Werkzeug durch Ziel 3 in Phase 1 ein Spielraum vom letzten Messwert bis zum Absenkziel gesetzt, in dem es sich bewegen darf. Ziel 5.1 sorgt dabei dafür, dass der Messwert so lange wie möglich vor Erreichen des Absenkziels gehalten werden soll. In Phase 2 kann das Abstau-Werkzeug lediglich das Absenkziel einhalten, bevor es in Phase 3 wieder auf das Stauziel fahren muss.

Das letzte Ziel sorgt dafür, dass der Abstau vorrangig mit der aktuellen Turbinenkapazität erfolgt, um auch den Aspekt der Energiegewinnung nicht zu vernachlässigen. Ohne diese Vorgabe würde das Abstau-Werkzeug die Absenkabgabe deutlich höher ermitteln. Im Vergleich zum Hochwasserschutz ist die Priorisierung dieser Fragestellung allerdings nachrangig. Die

aktuelle Turbinenkapazität ist (z.B. im Falle einer Revision) für jedes Kraftwerk vom Anwender manuell einstellbar.

RTC-Tools 2 arbeitet die Optimierungsziele schrittweise in der Folge ihrer Prioritäten ab. Das Ergebnis einer Optimierung wird in der darauf folgenden Stufe als Nebenbedingung (constraint) vorgegeben. Die letzten beiden Ziele 5.1 und 5.2 werden innerhalb eines Optimierungslaufs abgehandelt. Würde man Ziel 5.2 in einem separaten Optimierungslauf auf Stufe 6 berechnen, wäre infolge der Optimierung auf Ziel 5.1 kein Spielraum mehr, um das Endergebnis noch zu beeinflussen. Ziele auf derselben Ebene werden gleichzeitig berücksichtigt und können mit Gewichten gegeneinander abgewogen werden. Hier konnte eine Berücksichtigung der Turbinenkapazität erzielt werden, indem der Zeitpunkt des Abstaubeginns geringfügig weiter nach vorne rückt.

3 Anwendung des Abstau-Werkzeugs

3.1 Das Ereignis im Oktober 2018

Ende Oktober 2018 kam es an der Drau zu einem zweigipfligen Hochwasserereignis, welches in der Größenordnung eines HQ10 bis HQ30 lag. Dieses wurde im Verlauf der Staukette auf ein HQ7 retendiert (Moser et al. 2018). Die Reduktion des Hochwasserscheitels geschah dabei von 2.090 m³/s auf 1.582 m³/s in Lavamünd. Anhand dieses Ereignisses soll nun das Abstau-Werkzeug vorgestellt werden.

3.2 Optimierungsergebnis für das HW 2018

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse einer Optimierung für die Prognose vom 26.10.2018 um 13:00 Uhr (Angabe in MESZ, Delft-FEWS rechnet intern in UTC) für die beiden größten Staustufen Rosegg und Edling sowie Lavamünd, die letzte Staustufe der Kraftwerkskette. Die Zielwasserstände sind in grün, die Turbinenkapazität in grau gestrichelt eingetragen. Der Zufluss in die jeweilige Staustufe ist schwarz, laterale Zuflüsse werden in grau dargestellt. Das eigentliche Ergebnis der Berechnung sind die gefahrenen Wasserstände und Durchflüsse in rot bzw. blau. Sie stellen den unter allen in Kapitel 2 genannten Zielen optimalen Betriebszustand dar. Die Differenzen im Zu- und Abfluss sind blau für Abstau und rot für Wiederaufstau eingefärbt. Die magentafarbene Linie zeigt die vom COSERO-Modell errechnete natürliche Ganglinie des Hochwassers.

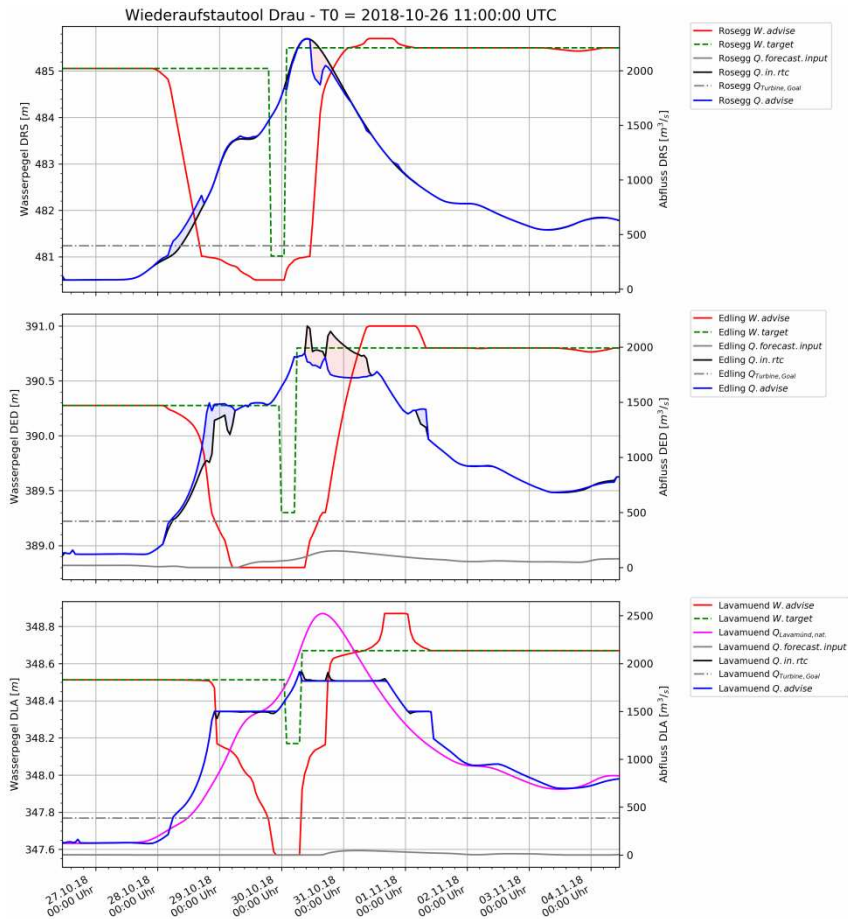


Abbildung 2: Optimierte Steuerung des HW 2018 für Staustufen Rosegg, Edling und Lavamünd

Anhand der Grafiken ist gut zu erkennen, wie das Modell der Kraftwerkskette den Abstau nutzt, um Stauraum für die Retention zu gewinnen. Die blauen Flächen zeigen dabei auf, wo der Abfluss vor dem Scheitel erhöht werden kann, um ihn später zurückzuhalten. Mit dem Erreichen des Zeitpunktes „Anfang Wiederaufstau“ werden dann die Stauräume gefüllt, wodurch eine Reduktion des Hochwasserscheitels von 2.537 m³/s bis auf 1.912 m³/s

realisiert werden kann. Langfristig sinkt der Abfluss danach sogar bis auf $1.817 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Grafik zeigt allerdings auch, dass der Retentionsraum in der Speicherkette nicht ausreicht, um das prognostizierte Hochwasser auf $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ zu limitieren. Auch die Unterschreitung des von der Wehrbetriebsordnung vorgegebenen Absenkziels $348,17 \text{ m}$ um 60 cm , konnte nicht genügend Rückhalteraum schaffen. Das Tool nutzt hierbei die maximal erlaubten Minimal- und Maximalwasser-pegel laut Wehrbetriebsordnung voll aus (zu sehen am 30.10. und 01.11.).

4 Fazit

Das Entscheidungsunterstützungssystem für die Drau wurde um ein Abstau-Tool erweitert, das mit Hilfe des Optimierungsprogramms RTC-Tools eine optimale Steuerung der Wehre bestimmt. Damit lassen sich die verschiedenen Vorgaben und Ziele aus Hochwasserschutz, Ökologie und Energieerzeugung mit ihren jeweiligen Prioritäten unter den jeweils aktuell vorliegenden hydrologischen Randbedingungen (Prognosen) in der Wehrsteuerung optimal berücksichtigen.

Es wurde gezeigt, dass das Abstau-Tool selbst bei einem extremen Ereignis, wie es die Prognose vom 26.10.2018 vorausgesagt hat, eine optimale Betriebsstrategie der Kraftwerkskette realisieren kann. Zwar wurde das Hochwasser im Modell nicht bis auf den maximal zulässigen Abfluss begrenzt, jedoch konnte der Abfluss unter Einhaltung aller relevanten Vorgaben eine deutliche Reduktion erfahren.

Zusätzlich ist festzustellen, dass das gemessene Hochwasserereignis deutlich kleiner als die für die Optimierungsrechnung verwendete Prognose war. Hier wird die Schwierigkeit der vorhersagebasierten Steuerungsoptimierung deutlich: Die Güte der Prognose bestimmt maßgeblich die Güte der Optimierung.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Absenkung in den Stauräumen Rosegg und Edling auf Basis einer behördlichen Sonderauflage 2 m bzw. 3 m tiefer ausfiel als das Absenkziel laut WBO vorsah. Die Möglichkeit der manuellen Übersteuerung des Absenkziels durch den Anwender ist eine von mehreren Weiterentwicklungen, die noch für das Abstau-Werkzeug vorgesehen sind.

Die Optimierung wird mit weiteren Hochwasserereignissen getestet. Dazu gehören zum einen zweigipflige Hochwasser, bei denen die Ermittlung der Hochwasserscheitel und damit das Verhalten der Zielermittlung im Hinblick auf verschiedene Abstauzeitpunkte analysiert wird. Zum anderen werden auch Hochwasser unterhalb der 1.500 m³/s Marke berechnet, um zu sehen, wie diese unter energiewirtschaftlichen Aspekten effektiv retendiert werden können. Mit diesen Untersuchungen soll sichergestellt werden, dass das Abstau-Werkzeug den verschiedenen Anforderungen aus Hochwasserschutz, Naturschutz und Energiewirtschaft gewachsen ist und kein Hochwasser die Kraftwerksbetreiber vor unvorhersehbare Probleme stellt.

5 Literatur

- Moser et al. (2018). Hydrologischer Bericht (Erstbericht), Hochwasserereignis an der Drau, Möll, Gail und Zudringern, 28. - 31.10.2018. Amt der Kärntner Landesregierung.
- Schwanenberg, D.; Becker, B. P. J.; Xu, M. (2015): The Open RTC-Tools Software framework for Modeling Real-Time Control in Water Resources Systems. *Journal of Hydroinformatics* Jg. 17 (2015) Nr. 1 S. 130–148.DOI: 10.2166/hydro.2014.046.
- WBO (2014): Kraftwerkskette Drau, Wehrbetriebsordnung, Bescheid vom 29.12.2014, nicht veröffentlicht, Verbund Hydro Power GmbH
- Werner, M.; Schellekens, J.; Gijsbers, P.; van Dijk, M.; van den Akker, O.; Heynert, K. (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system. *Environmental Modelling & Software* Jg. 40 (2013) S. 65–77.DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.07.010.

Autoren:

Dr. Oliver Buchholz
Simone Patzke
Hendrik Burkamp

Ulrich Haberl
Dr. Simon Frey

Hydrotec Ingenieurgesellschaft
für Wasser und Umwelt mbH
Bachstraße 62-64
D-52066 Aachen

VERBUND Trading GmbH
Am Hof 6A
A-1010 Wien

Tel.: +49 241 94689-0
Fax: +49 241 94689-915

Tel.: +43 50313-523-0
Fax: +43 50313-51099

E-Mail:
oliver.buchholz@hydrotec.de
simone.patzke@hydrotec.de
hendrik.burkamp@hydrotec.de

E-Mail:
ulrich.haberl@verbund.com
simon.frey@verbund.com

Dr. Maarten Smoorenburg
Dr. Bernhard Becker

Deltares
Office Delft
Boussinesqweg 1
NL-2629 HV Delft

Tel.: +31 88 335-8137
Fax: +31 88 335-8582

E-Mail:
maarten.smoorenburg@deltares.nl
bernhard.becker@deltares.nl

BIM-Einsatz bei kleineren Planungsprojekten – geht das nicht zu weit?

Levon Vardanyan
Stephan Heimerl
Beate Kohler

Auch kleinere Planungsprojekten sind teilweise so komplex, dass der Einsatz von BIM gerechtfertigt ist und diese Planungsmethode bei der Planung unterstützt. Dies wird im Beitrag anhand von zwei Kleinwasserkraftwerken dargestellt.

1 Einleitung

In den bislang geführten Diskussionen über den Einsatz von BIM im Planungsbereich werden kleinere Projekte selten erwähnt. Diese Zurückhaltung ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Aufwand für den Einsatz von BIM nur bei großen Vorhaben gerechtfertigt scheint und mögliche Komplexität sowie Schwierigkeitsgrad bei kleineren Projekten oft falsch eingeschätzt werden. Häufig liegt diese Zurückhaltung auch an der fehlenden Projekterfahrung sowie den vordefinierten Bibliotheken und Vorlagen, da vor allem bei Wasserbauten und Wasserkraftanlagen vielfach Objekte benötigt werden, die speziell für die jeweilige Anlage angefertigt werden und deren Aufbereitung im BIM-Modell aufwändig werden kann.

Bei zwei Kleinwasserkraftprojekten im Schwarzwald hat sich gezeigt, dass der Einsatz von BIM auch bei der Planung von derartigen kleinen Anlagen hilfreich und keinesfalls übertrieben ist. Es handelt sich um die beiden geplanten Mindestwasserkraftwerke an der Schluchsee- und an der Schwarza-Talsperre (Abbildung 1) der Schluchseewerk AG im Süden Baden-Württembergs. Da die Planungen an der Schluchsee-Talsperre während der Beitragserstellung noch nicht abgeschlossen waren, stellen die hier dargestellten Bilder noch nicht die finale Ausführungsplanung dar.

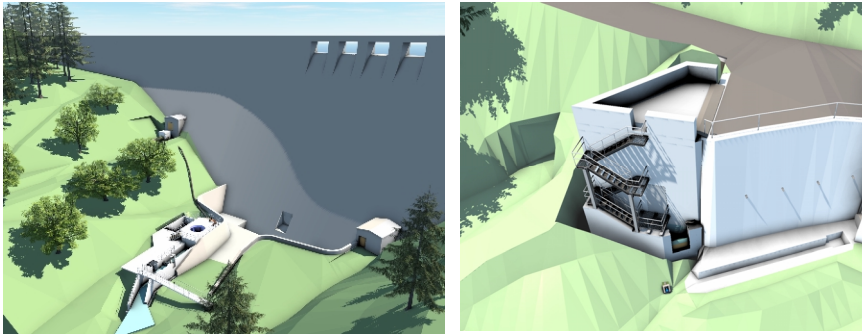


Abbildung 1: Schluchsee-Talsperre (links); Schwarza-Talsperre (rechts) (Quelle: FWT)

An den beiden gut 80 Jahre alten Talsperren muss künftig Mindestwasser abgegeben werden. Hierfür sind Mindestwasserkraftwerke genehmigt worden und in Planung.

Obwohl die Aufgabenstellung an beiden Bauwerken dieselbe ist, unterscheidet sie sich jedoch wie folgt:

An der Schluchsee-Talsperre soll ein Bauwerk mit Zugang für die Öffentlichkeit entstehen und somit nicht nur funktional, sondern auch Aspekte der öffentlichen Information beinhalten.

An der Schwarza-Talsperre hingegen ist kein Publikumsverkehr vorhanden, dafür muss das Bauwerk in einen sehr engen Raum zwischen eine bestehende Stützmauer und einen vorhandenen, bergmännisch erstellten Stollen zur Baumleitung, von dem ausreichend Abstand einzuhalten ist, eingefügt werden.

Die Fichtner Water & Transportation GmbH (FWT) war von Beginn an in das Projekt involviert und übernahm bereits die Genehmigungsplanung. Die Schluchseewerk AG als Bauherr stellte die Planungsunterlagen aus der Bauzeit sowie, soweit vorhanden, neuerer Zeit zur Verfügung. Aufgrund des Alters der Bestandsanlagen waren diese nicht immer exakt bzw. stellten teilweise auch Planungsstände und nicht den final gebauten Zustand dar. Des Weiteren stammen die Unterlagen aus unterschiedlichen Jahrzehnten mit unterschiedlicher Genauigkeit und sind daher zum Teil widersprüchlich. Schon im Rahmen der Genehmigungsplanung war ein ständiger Vergleich unterschiedlicher Planungsstände notwendig, um mögliche Fehler zu vermeiden.

Die zahlreichen Widersprüche und die beengten Platzverhältnisse führten dazu, dass bereits in der Entwurfsplanung ein 3-D-Modell verwendet wurde, um die kritischen Stellen ausreichend zu berücksichtigen.

Aufgrund der Komplexität beider Projekte fiel zu Beginn der Ausführungsphase die Entscheidung, für die weitere Projektabwicklung die BIM-Methode zu verwenden.

2 Entscheidungsgrundlage

Folgende Kriterien führten dazu, das Projekt mit der BIM-Methode abzuwickeln:

- Mehrere Entwurfsvarianten sollten erstellt und dem Kunden zur Entscheidung vorgelegt werden.
- Die beengten Platzverhältnisse können ausreichend analysiert und die beste Lösung gefunden werden.
- Bei FWT gibt es bereits Personal mit der einschlägigen Erfahrung.
- Einige Projekte wurden bereits in Little-Closed-BIM abgewickelt, wodurch die entsprechenden Vorlagen und Bibliotheken vorhanden waren.

3 Definition

Das gesamte Projekt wurde im Little-Closed-BIM abgewickelt, wobei mehr die Detaillierung der Geometrie (Level of Geometry (LOG 300 und höher)) beachtet wurde als die Attributierung (Level of Information (LOI 100-250)). Obwohl die Projektabwicklung im BIM erst in der Ausführungsphase gestartet ist, kamen im Projektlauf auch die BIM4Infra-Anwendungsfälle (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019)) AWF1, AWF2, AWF3, AWF4, AWF5, AWF8, AWF10 und AWF11 zur Anwendung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Unterlagen aus den früheren Projektphasen erst einmal nachdigitalisiert werden mussten. Außerdem wurde genau festgelegt, welche Gewerke in den BIM-Prozess einbezogen werden, nämlich Bautechnik, Tragwerksplanung, Hydraulik, Maschinenbau, Stahlwasser- und Rohrleitungsbau sowie Steuerungs- und Leittechnik.

4 Ziele

Folgende Ziele wurden festgelegt:

- Effiziente Projektabwicklung durch:
 - o Überlagerung und Vergleich der unterschiedlichen Planstände.
 - o Berücksichtigung der Anforderungen einzelner Gewerke, des Kunden, in rechtlicher Hinsicht (Arbeitsschutz etc.) sowie der Platzverhältnisse.
 - o Schnelle Änderung und Anpassung einzelner Pläne aufgrund von zentralem 3-D-Modell.
- Einsatz von numerischer Strömungssimulation anhand der vorhandenen 3-D-Bauwerke.
- Bessere Vorstellung der einzelnen Entwurfsvarianten durch Visualisierung.
- Optimierung des Zusammenspiels der einzelnen Austauschformate.
- Ermittlung des Mehrwerts des BIM-Einsatzes bei derartigen Projekten.

5 Ablauf

Eingangs mussten die Bestandsunterlagen bereinigt, verglichen und digitalisiert werden. Gescannte Unterlagen wurden vektorisiert, 2-D-CAD-Vermessungen wurden mit Civil 3D aufbereitet, die 2-D-Bauwerke wurden mit Revit in einen 3-D-Plan überführt. Da das Bauwerk an der Schluchseetalsperre auch eine öffentlichkeitswirksame Gestaltung bekommen sollte, wurde auch die Talsperre digitalisiert (Abbildung 2).

Der Gesamtaufwand für die Digitalisierung des Bestandes umfasste knapp 2 Wochen, was in Anbetracht der Komplexität überschaubar war.

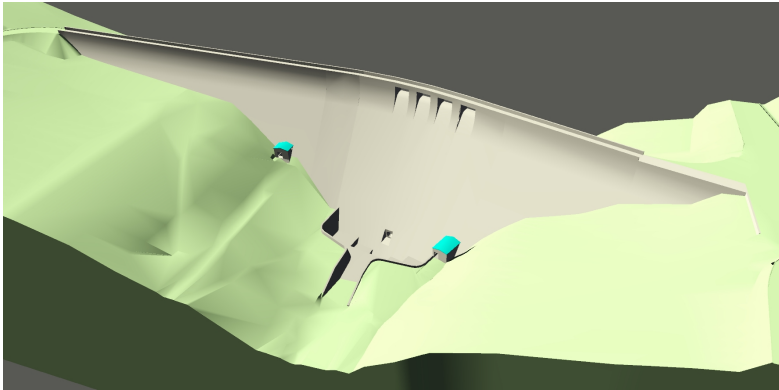


Abbildung 2: Bestand Schluchsee mit Talsperre (Quelle: FWT)

Am Standort Schwarza wurde die Talsperre nicht in die Digitalisierung einbezogen, weil der Standort des neuen Bauwerks unterhalb der Talsperre neben einem Bestandsbauwerk liegt. Dafür musste jedoch der bergmännisch aufgefahrene Stollen für die bauzeitliche Umleitung in den Bestand eingearbeitet werden (Abbildung 3).

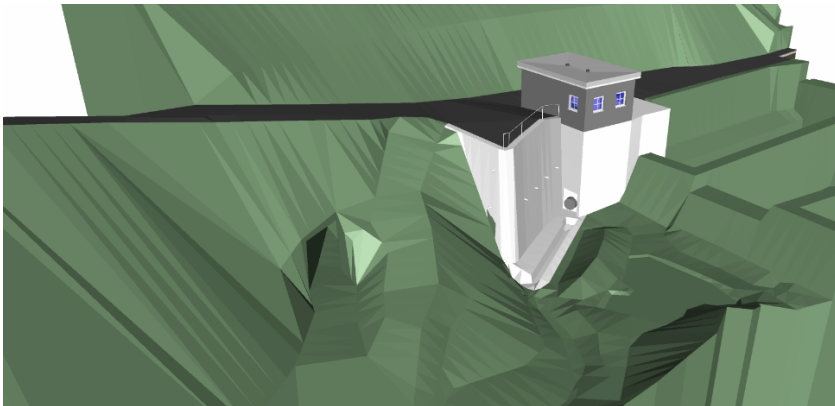
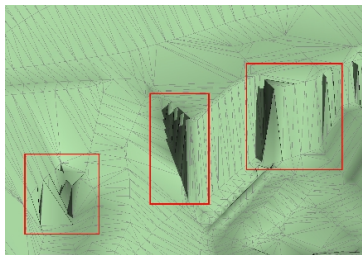


Abbildung 3: Schwarza-Bestand mit dem Blick auf den Stollen (Quelle: FWT)

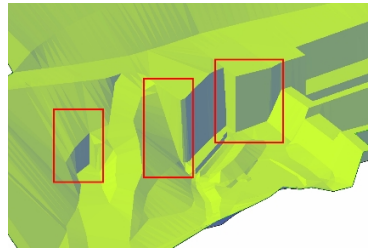
Das digitale Geländemodell (DGM) spielte bei beiden Projekten eine wichtige Rolle und war vor allem bei der Schwarza-Talsperre von signifikanter Bedeutung.

Das Integrieren des Geländes (v. a. Baugrube) war für beide Standorte eine Herausforderung, weil das gewählte Softwarepaket folgende Einschränkungen hat:

1. In Revit wird das Gelände nur über Punkte modelliert und steile Geländekanten werden erst gar nicht berücksichtigt. Revit kann nur senkrechte Baugruben erstellen (Funktion Sohle), also kann der bergmännische Stollen als Öffnung nicht modelliert werden (Abbildung 4).



Revit



Civil 3D

Abbildung 4: Vergleich: Schwarza-DGM mit Revit und mit Civil 3D (Quelle: FWT)

2. In Civil 3D konnte man zwar das Gelände modellieren, aber es gab zur Zeit der Projektabwicklung keine ausreichende Möglichkeit, das Civil-3D-Gelände in Revit zu übertragen.
3. Zusätzlich weist auch das Civil-3D-DGM keine direkte Möglichkeit auf, einen Stollen zu erstellen aufgrund der Einschränkungen der Delaunay-Triangulation, die Civil 3D im Hintergrund verwendet.
4. Damit das Gelände konstruiert und in das Gesamtmodell integriert werden kann, wurde eine eigene Methodik entwickelt (Abbildung 3).

6 Planung der Anlagen

Durch die überschaubare Größe des Projekts und die bisherige Projekterfahrung reduzierte sich der Aufwand des Modellierens spürbar. Dabei konnten die Anforderungen aller projektbeteiligten Fachbereiche berücksichtigt und

die Bearbeiter unterschiedlicher Gewerke rechtzeitig über die Unstimmigkeiten informiert, Kollisionen besprochen und gelöst werden.

Für das Bauwerk an der Schluchsee-Talsperre sollten aufgrund der öffentlichen Zugänglichkeit mehrere Entwurfsoptionen erstellt werden (Abbildung 5). Diese wurden dann mit einem Animationsprogramm weiterverarbeitet und davon virtuelle Modelle erstellt, mit deren Hilfe der Kunde bereits in diesem frühen Projektstadium anhand anschaulicher Darstellungen eine fundierte Variantenauswahl vornehmen konnte.



Abbildung 5: Entwurfsoptionen (Quelle: FWT)

Bei der Schwarza-Talsperre konnte der notwendige Sicherheitsabstand des Stollens zur Baugrube an allen Punkten berücksichtigt werden, während in einem ersten 2-D-Modell nur einzelne Schnitte auf den vorhandenen Sicherheitsabstand geprüft werden konnten.

Die sehr begrenzte Baufläche beschränkte das potenzielle Baufeld des Kraftwerks. Durch das 3-D-Modell konnte die verfügbare Fläche optimal ausgenutzt werden mit Einhaltung aller notwendigen Sicherheitsabstände und Arbeitsräume etc. (Abbildung 6).

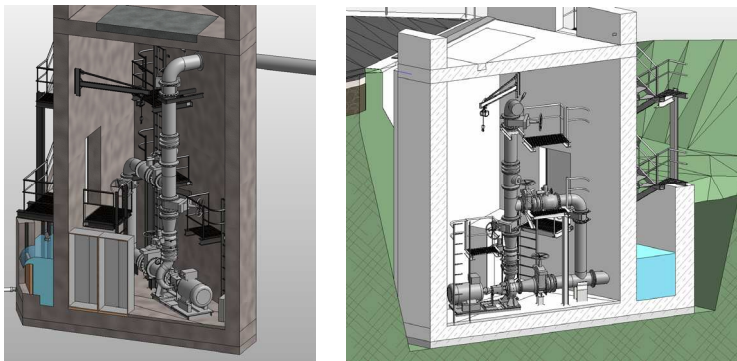


Abbildung 6: Schwarza Innenraum (Quelle: FWT)

7 Berechnungen, Ausschreibung und Visualisierung

Die im Modell eingepflegten physikalischen und geometrischen Informationen aus dem Single-Source-Modell konnten im weiteren Projektverlauf rasch in die Analyse- und AVA-Programme übertragen und u. a. folgende Aspekte darauf basierend erarbeitet werden:

- Hydraulische Nachweise mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen (Abbildung 7)

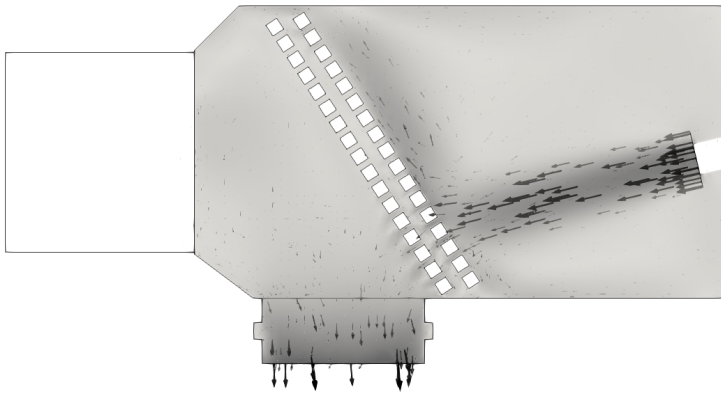


Abbildung 7: Numerische Simulation (Quelle: FWT)

- Statische Berechnungen
- Leistungsverzeichnis und Baubeschreibung
- Animierte Darstellung des finalen Zustands zum besseren Verständnis durch den Kunden und Dritte (Abbildung 8)

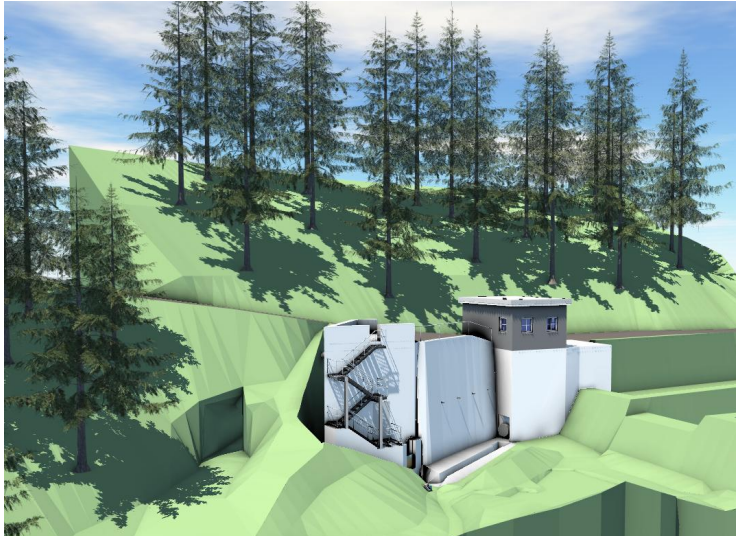


Abbildung 8: Animierte Darstellung des finalen Zustands (Quelle: FWT)

8 Änderungsmanagement und Revision

Wie auch in den Phasen der Bestandsdigitalisierung oder Planung wurden die notwendigen Änderungen zügig eingearbeitet und die Ausführungspläne konnten rasch aktualisiert werden, womit sich der Gesamtaufwand spürbar reduzierte.

9 Lessons Learned

- Die Kommunikation ist alles:
 - o Die Besprechung aller möglichen Aspekte der Bestandsdigitalisierung, Modellierung, Attribuierung vor Beginn der Arbeiten reduzierte essenziell die Notwendigkeit etwas nachzuarbeiten.
 - o Eine engere Kommunikation unter den Projektbeteiligten ist zwingend notwendig, um Ungereimtheiten schnell zu erkennen.
- BIM erfüllt was es verspricht:
 - o Besseres Verständnis der Sachlage.

- Effiziente Projektbearbeitung anhand des Single-Source-of-Throuth-Modells.
- Eingangs erhöhter Aufwand, der in den folgenden Planungsschritten zu bedeutenden Synergien, Aufwandsreduzierungen und Fehlerminimierung führt.
- Reduzierung und Verbesserung der Nachbearbeitungen.
- Bessere Wahrnehmung seitens Personen, die keinen technischen Hintergrund haben.
- Notwendigkeit der Definition der richtigen BIM-Methode für das jeweilige Projekt (Little Closed, Little Open etc.).
- Einsatz von BIM ist auch bei kleineren, komplexeren Projekten sinnvoll, um unterschiedliche Gewerke einfacher zusammenzubringen, auch wenn nicht explizit vom Kunden erwünscht.

10 Literatur

Bundesministerium für Verkehr und Digitalisierung (2019): Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle. BIM4Infra2020 Handreichungen und Leitfäden, Teil 6, Stand April 2019.

Autoren:

Dipl.-Ing. Levon Vardanyan
Prof. Dr.-Ing. Stephan Heimerl
Dr.-Ing. Beate Kohler

Fichtner Water & Transportation GmbH
Sarweystr. 3
70191 Stuttgart

Tel.: +49 711 8995 1583
Fax: +49 711 8995 666
E-Mail: levon.vardanyan@fwt.fichtner.de
stephan.heimerl@fwt.fichtner.de
beate.kohler@fwt.fichtner.de

BIM in der Deichplanung, Ansätze, Erfolge und Herausforderungen

Ilja Prinz

Building Information Modeling (BIM) ist in einigen Bereichen des Bauwesens, wie bspw. dem Hochbau, bereits stark etabliert. Die modellbasierte Arbeitsmethodik verlangt Änderungen der Prozesse und Werkzeuge auf vielen Ebenen, intern wie auch extern. Um diese Herausforderungen zu erfassen haben CDM Smith im Rahmen eines eigens ausgetragenen Projekts und einer begleitenden Masterarbeit die Möglichkeiten und Vorteile der BIM Methode an einer Deichplanung (Deichsanierung Himmelgeist Ortslage) durchgespielt. Unsere Erfahrungen sind im Folgenden zusammengefasst.

1 Einleitung – Kurzer Überblick über das Projekt

Der Hochwasserschutz im Düsseldorfer Ortsteil Himmelgeist weist Fehlhöhen zum Bemessungsziel auf. Zudem erfüllt die Standsicherheit des Deiches nicht mehr die Anforderungen der aktuellen Regeln der Technik. Nach Vorliegen der Planfeststellung im Jahr 2018 erstellt CDM Smith im Rahmen einer ARGE die Ausführungsplanung und Ausschreibung der Sanierungsarbeiten einschließlich geotechnischer, landschaftspflegerischer und vermessungstechnischer Leistungen. Der Hochwasserschutz wird auf einer Länge von ca. 1,5 km durch eine abschnittsweise rückverankerte Spundwand mit aufgesetzter, verklinkerter Hochwasserschutzwand aus Stahlbeton und mobilen Hochwasserschutzelementen ertüchtigt. Der Verlauf durch die dicht bebaute Ortslage, einige historische Gebäude und die teilweise engen Platzverhältnisse stellen besondere Herausforderungen bei Ausführungsplanung und baulicher Umsetzung dar. Neben der Ertüchtigung des Hochwasserschutzes sind die Entwässerung von Grundstücken, der Ersatzneubau einer Ortsdurchfahrt einschl. Kanalbau und kreuzende Entwässerungsleitungen Bestandteil der zu erbringenden Planungsleistungen.

2 Zielsetzung für den internen BIM Piloten

Neben der klassischen ingenieurtechnischen Bearbeitung des oben genannten Projekts hat sich CDM Smith im Rahmen eines internen Pilotprojekts zum Ziel gesetzt die BIM Arbeitsmethodik, die bereits aus Planungen von bspw. Massivbaubauwerken bekannt war, für Infrastrukturbauwerke, konkret die Deichplanung des genannten Projekts, auf die Probe zu stellen. Folgende Ziele wurden definiert:

- Qualifizierte 3D Modellierung des gesamten Deiches und aller zugehörigen Bauteile (Spundwände, Hochwasserschutzwände, Wege, Kanäle)
- Mengenermittlung am Modell
- Bauablaufsimulation
- Verknüpfung der Modelle und Mengen mit einer AVA Software zwecks Erstellung der Leistungsverzeichnisse.

3 Herangehensweise

Zu aller erst stand die Frage nach den Prozessen im Raum. Welche Informationen sind in welcher Detailtiefe im Model erforderlich, welche werden für spätere Auswertungen und Fragestellungen benötigt und wie werden diese eingepflegt, vorgehalten und ausgewertet. Grob zusammengefasst wurde definiert, dass der Deichkörper mit allen Schichten und Bauteilen so modelliert wird, dass eine für die Ausschreibung ausreichende Mengenermittlung möglich ist. Vor der Modellierung und Umsetzung der angedachten Ziele war eine Recherche der in Frage kommenden Werkzeuge erforderlich. Die Herausforderung hierbei liegt insbesondere in den noch nicht definierten und ausgearbeiteten offenen Austauschformaten, die es ermöglichen Modelle und Modellinformationen in einer konsistenten Form und ohne Verluste zwischen den unterschiedlichen Werkzeugen (CAD-AVA) auszutauschen. Als Ergebnis der Recherche kamen folgende Produkte in Frage:

- Autodesk Civil 3D (Modellerstellung und einfache Mengenermittlung).
- Ceapoint Desite MD Pro (Modellbasierte 4D (Zeit) und 5D (Kosten) Simulation.

Nachdem die Werkzeuge definiert waren wurden in Civil 3D, mit Zuhilfenahme von parametrischen und dynamischen Querschnitten der Deichkörper

samt der geplanten Hochwasserschutzwand, der Deichverteidigungswege und deren Querungen modelliert. Aus den Querprofilen wurden 3D Profilkörper, und aus diesen dann die Oberflächen der einzelnen Schichten bzw. 3D Volumenkörper abgeleitet.

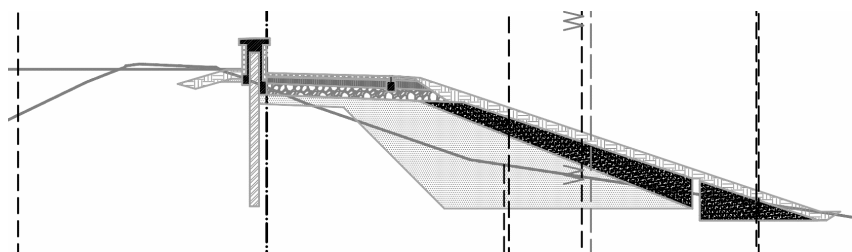


Abbildung 1: Exemplarisches Querprofil

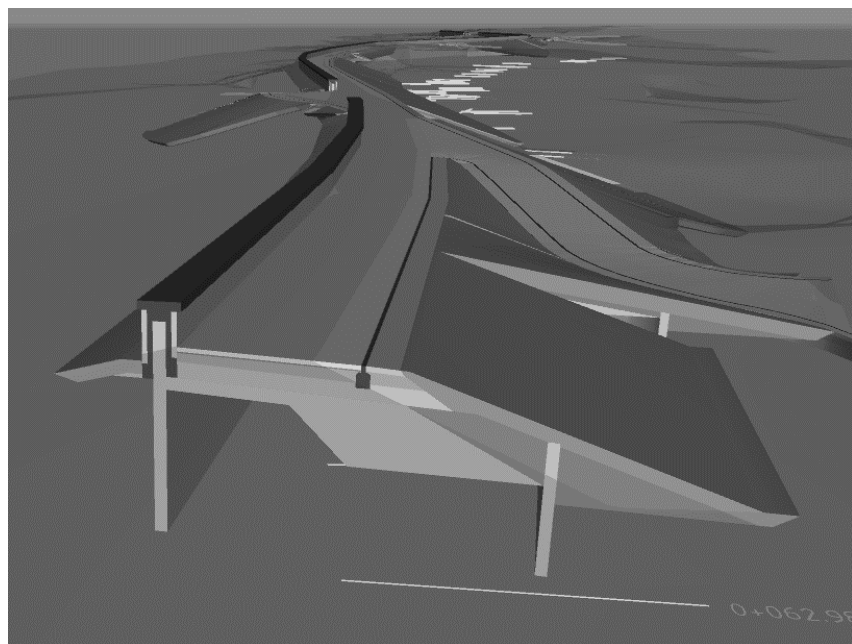


Abbildung 2: 3D Model Deichkörper

Ungeachtet der fehlenden IFC Klassen für den Infrastrukturbereich ist ein Export der 3D Volumen über die IFC Schnittstelle möglich. Es werden allerdings nur Building Element Poxies exportiert. Eine automatische Mengenermittlung mit den korrekten Einheiten und Zuordnung zu LV Texten bzw. Positionen in der AVA Software ist ohne Weiteres nicht möglich. Ein idealerweise automatisches Erkennen der Objekttypen und Zuordnung zu entsprechende LV Positionen bzw. Kostengruppe bedingt eine Existenz der Kategorien im IFC Format.

Auf Grund des Pilotcharakters des Projekts und der momentan noch laufenden Ausführungsplanung wurde als „proof of concept“ nur ein Teilbereich für die Weitergabe in die 4D und 5D Software MB Desite Pro übergeben. Wie schon erwähnt war hier aber ein manuelles Sortieren erforderlich. Ungeachtet dieser Tatsache sind eine Mengenermittlung und Zuordnung zu entsprechenden LV Positionen möglich. Somit ist die Machbarkeit, trotz noch fehlender Eleganz und Automation, gegeben. Aus dem „proof of concept“ Modell wurden die im allgemeinen erforderlichen Mengen ermittelt und mit Leistungsbeschreibungen versehen. Ferner konnten die Objekte mit Ereignissen in einem Projektablaufplan verknüpft werden, was eine Simulation des Bauablaufs und der Kosten erlaubt.

4 Erkenntnisse

Die Modellierung des Deiches und dazugehörigen Bauteile und Wege stellt kein Problem dar. Hier gibt es gut ausgereifte Werkzeuge, die den Ingenieur in der Planung und in der Erkenntnisgewinnung unterstützen. Parametrische und Dynamische Querprofile erlauben den Aufbau eines flexiblen Modells, an dem Änderungen einfach vorgenommen werden können und eine direkte Auswirkung auf die gesamte Planung sichtbar wird. Die Mengenermittlungen in der CAD Software ist möglich, doch leider finden die dort ermittelten Mengewerte noch keine direkte, digitale Verbindung mit dem Leistungsverzeichnis. Um dieses zu bewerkstelligen muss diese Auswertung in die AVA Software ausgelagert und momentan vom Anwender zusätzlich eine Parametersatz im der CAD Software für die Bauteile definiert und manuell eingegeben und gepflegt werden. Diese Parameter könnten dann bspw. mit eigens erstellten Routinen in der 4D und 5D Software ausgelesen werden umso eine teilweise automatische Zuordnung zu bewerkstelligen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die BIM Arbeitsmethodik auch im Bereich der Deichplanung eingesetzt werden kann. Allerdings ist die Umsetzung auf Grund der fehlenden Austauschformate etwas holprig und nicht so elegant wie man es aus bspw. dem Hochbau kennt. Ungeachtet dessen, bietet die BIM Arbeitsmethode, trotz der genannten Herausforderungen, nach unserer Erkenntnis und Einschätzung einen immensen Mehrwert für die Deichplanung.

Autor:

Ilja Prinz

CDM Smith Consult GmbH
Friedrichsring 46
68161 Mannheim

Tel.: +49 176 23109559
E-Mail: ilja.prinz@cdmsmith.com

BIM im Bestand für Betrieb und Unterhaltung von Wasserbauwerken – Das Initialprojekt »Neue Schleuse Trier«

Ralf Becker
Sigfrid Knapp

1 Problemstellung

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) sieht in der konsequenten Digitalisierung von Planung, Ausführung und Betrieb einen entscheidenden Schlüssel für eine schnellere, qualitativ bessere und wirtschaftlichere Realisierung von großen Infrastrukturprojekten. In einem Stufenplan „Digitales Planen und Bauen für Infrastrukturprojekte“ im Bereich des BMVI wurde der Weg zur Digitalisierung des Planungs- und Bauprozesses formuliert. Zentrales Element soll hierbei die Arbeitsmethodik „Building Information Modeling“ (BIM) sein. Die BIM-Planungsmethode beinhaltet u. a. ganzheitliche und konsistente Informationsmodelle für Bauwerke. In den entsprechenden BIM-Modellen werden dabei die dreidimensionale Geometrie und die semantischen Informationen der Bauteile eines Bauwerks zusammengeführt. Diese Verfahrensweise wurde durch den Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung (Bundesregierung (2018)) bestätigt: „... Deshalb werden wir BIM baldmöglichst bei allen neu zu planenden Verkehrsinfrastrukturprojekten zur Anwendung bringen.“

2 Planen – Bauen – Betreiben 4.0

Bei der Umsetzung der sog. vierten industriellen Revolution im Bauwesen wird, entsprechend Industrie 4.0 und Verwaltung 4.0, vielfach vom Planen – Bauen – Betreiben 4.0 gesprochen (Bödefeld (2017)). Im Kern sind dabei die Digitalisierung von Prozessen und die Verknüpfung von IT-Komponenten unentbehrlich, um letztlich eine Vernetzung von Einzellösungen und Softwareinseln zu erreichen. Angesichts des immer dramatischer vorschreitenden Verfalls der Infrastrukturbauwerke erhoffen sich Politik und Verwaltung durch den Einsatz von BIM große Fortschritte und eine schnellere Abwicklung mit höherem Qualitätsmanagement auch bei Betrieb und Unterhaltung von Bauwerken des Verkehrswasserbaues.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) interpretiert BIM für den Betrieb und die Unterhaltung als ein „Informationsmodell für Bauwerke“ und nicht als ein „Bauwerksmodell mit Informationen“. Aktuelle und präzise As-built-Modelle bilden dabei einen wichtigen Bestandteil für die geometrische Repräsentation des Bauwerkes.

3 BIM im Verkehrswasserbau

Das in diesem Beitrag beschriebene Modell soll eine Weiternutzung für die Belange des Betriebs und der Unterhaltung sowie eine Verknüpfung mit Bestandsinformationen in den vorhandenen Anwendungen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ermöglichen. Perspektivisch ist die Verwendung der Objektmodelle u. a. Verortung von Informationen aller Art (z. B. Pläne und Anleitungen), zur Dokumentation von Schäden im Rahmen der Bauwerksinspektion und zur optimierten Planung von Instandsetzungen vorgesehen.

Im Rahmen eines Projektes, das in einer Forschungskooperation der BAW mit dem Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen durchgeführt wird, soll neben BIM-Modellen für den Planungs- und den Bauzustand ein Objekt- bzw. Bauteilkatalog der grundlegenden Bauteile eines Schleusenbauwerks erarbeitet werden. Dabei werden Standards der WSV, wie z. B. der WSV-Objektkatalog (VV-WSV 1102), berücksichtigt. Die Ergebnisse werden eine Basis für die Vereinheitlichung der BIM-basierten Objektbeschreibung in der WSV bilden und können in nationale und internationale Standards, wie z. B. die Industry Foundation Classes (IFC), eingebracht werden. Untersuchungsschwerpunkt ist die Bewertung unterschiedlicher geodätischer Methoden zur Erfassung der Bestandssituation hinsichtlich ihrer technischen Möglichkeiten und des wirtschaftlichen Aufwandes für die effiziente Digitalisierung der Verkehrswasserbauwerke. Ziel ist hierbei sowohl die Erstellung sogenannter As-Built-Modelle (Bestandsmodelle) nach Beendigung der Bauphase als auch die Erfassung des Bestandes vor einer Instandsetzungs- oder Neubaumaßnahme.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes bildet die Untersuchung geeigneter Visualisierungs- und Analysemethoden zum Soll-Ist-Vergleich zwischen Planungs- (as-planned) und Bauzustand (as-built) auf Basis der erarbeiteten BIM-Modelle. Für Präsentationszwecke wird eine texturierte Oberflächenvisualisierung der BIM-Modelle erarbeitet.

Die entwickelten BIM-Modelle sollen eine Weiternutzung für Belange des Betriebs und der Unterhaltung sowie eine Verknüpfung mit Bestandsinformationen in vorhandenen WSV-Anwendungen wie z. B. Wasserstraßeninfrastrukturdaten (WInD) oder die Digitale Verwaltung technischer Unterlagen (DVtU) ermöglichen. Perspektivisch ist die Verwendung der Objektmodelle, z. B. zur Dokumentation von Schäden im Rahmen der Bauwerksinspektion (WSVPruf) und zur optimierten Planung von Instandsetzungen denkbar. Alle genannten Arbeiten sollen in ein Implementierungskonzept für vergleichbare Vorhaben münden. Übergeordnetes Ziel ist die langfristige WSV-weite Digitalisierung von Objekten und Prozessen für Planung, Bau, Unterhaltung und Betrieb von Verkehrswasserbauwerken.

4 Das Initialprojekt »Neue Schleuse Trier«

Die Methode BIM soll definitionsgemäß im gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks zur Anwendung kommen (Abbildung 1).

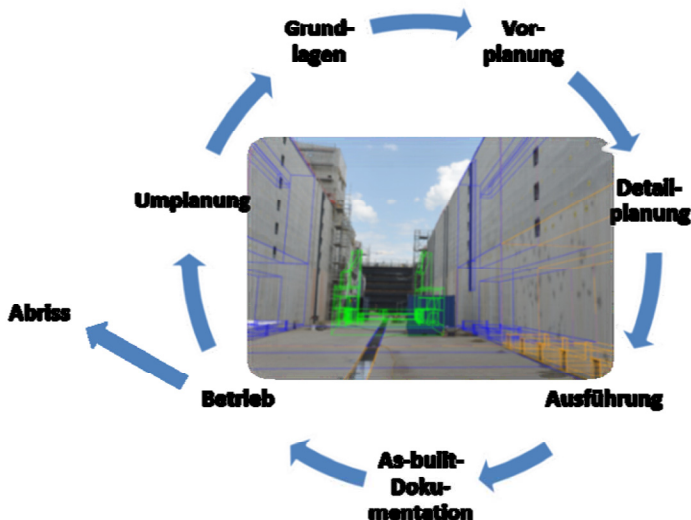


Abbildung 1: BIM im Bauwerkslebenszyklus

Meist wird heute lediglich die Neuplanung eines Bauwerks behandelt, nicht die Betriebsphase. Gerade bei Verkehrswasserbauwerken wie den Schleusen ist eine Vielzahl jedoch bereits vorhanden. Daher müssen diese vermes-

sungstechnisch im Ist-Zustand erfasst (As-is) und für das BIM-basierte Betriebs- und Unterhaltungsmanagement modelliert werden.

Basis der Modellierung sind BIM-Objektkataloge, die allerdings für Verkehrswasserbauwerke bisher nicht existieren. International wird derzeit durch die Organisation buildingSmart eine Standardisierung für Wasserstraßen und Häfen vorangetrieben. Beim Aufbau eines BIM-Objektkataloges und einer Objektsystematik für dieses Projekt konnten insbesondere die vorhandenen Standards der WSV genutzt werden. Die Gliederungsebenen (z. B. Schleuse – Schleusenkammer – Kammerwand) unterscheiden sich bei den genannten Organisationen WSV und buildingSmart zwar vielfach leicht in den Benennungen, jedoch geht diese Systematik konform mit der des Hochbaus (Gebäude – Geschoss – Bauelement (z.B. Wand)). So ist es in diesem Projekt gelungen, in der seitens der WSV und der BAW verwendeten Software Bentley AECosim Building Designer, dessen Nachfolger der OpenBuildings Designer (Bentley 2019) ist, die Objektstruktur des Hochbaus auf die Schleuse zu übertragen (Abbildung 2).

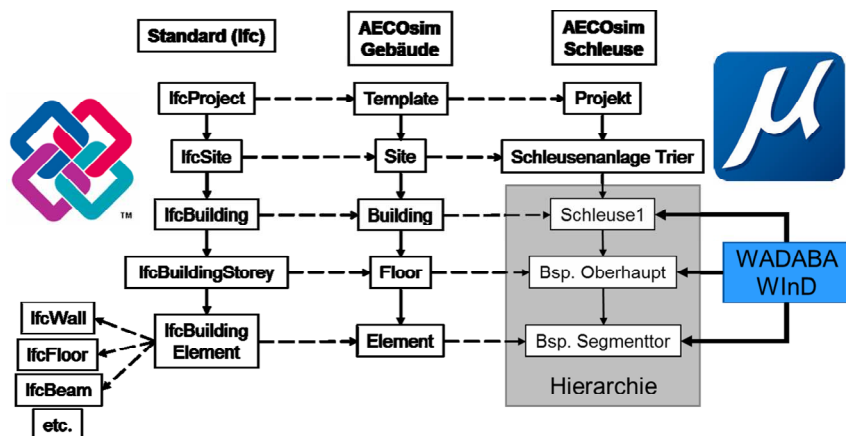


Abbildung 2: Objektsystematik für Schleusen im AECosim Building Designer in Anlehnung an die Systematik im Hochbau

Während in der Abfolge der Planungs- und Ausführungsphasen bei der Erstellung von Bauwerken der Detaillierungsgrad sowohl geometrisch als auch semantisch ansteigt, was sich in den Fertigstellungsgraden (Level of Development, LOD) ausdrückt, sind für die Betriebsphase die für die Betriebsführung und Unterhaltung notwendige geometrische Detaillierung und semantische Information festzulegen. Es stellte sich z. B. die Frage, ob die Schleusen-

kammerwände als eine Wand oder als mehrere Teile - aufgeteilt nach den Baufugen oder den Kammerblöcken - modelliert werden soll. Ist hier eine rein strukturelle Aufteilung der Schleusenammerwände sinnvoll (Kammerblöcke) oder sollten in einem Guss erstellte Abschnitte (Aufteilung nach Baufugen) als selbständige Objekte entstehen (Abbildung 3)? Die letztere Variante bietet beispielsweise den Vorteil, die separat entstandenen Bauelemente mit Attributen bezüglich des exakten Materials oder Baudatums zu versehen. Sie bedürfen – jedenfalls in diesem Fall – aufgrund der komplexeren Strukturen eines höheren Aufwandes bei der Modellierung. Den geringsten Aufwand bedeutet es, wenn im Fall der Kammerwände komplett auf eine Unterteilung verzichtet wird. Etwaige Unebenheiten oder Verkantungen innerhalb der Kammerwand bleiben dann im Modell jedoch unsichtbar.

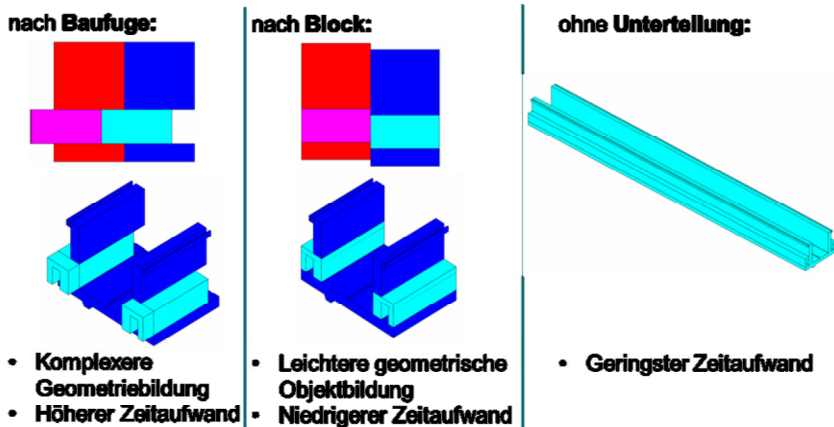


Abbildung 3: Ansatz zur Unterteilung von Objekten, Bsp. Schleusenammer

Der Aufwand erhöht sich wiederum, wenn sogar Ausrüstungsbauteile wie Poller oder Leitern inklusive der hierfür vorgesehenen Aussparungen modelliert werden sollen. In diesem Projekt wurde die Neue Schleuse Trier in verschiedenen Detaillierungsgraden modelliert, um die Unterschiede bis hin zum Zeitaufwand der Modellierung herauszuarbeiten. Beispielhaft wurden mit hohem manuellem Aufwand auch einige Poller und Leitern inklusive der Aussparungen in der Kammerwand möglichst detailgetreu modelliert. Vor dem Hintergrund, dass solche Ausrüstungsbauteile in ihrer geometrischen Ausprägung häufig Normen wie hier der DIN 19703 entsprechen müssen, sollten sie für eine Modellierung als Katalogobjekte dem Modellierer zur

Verfügung stehen. Für besagte Norm wird derzeit im Kooperationsprojekt ein Katalog aufgebaut.

Im Kooperationsprojekt wird noch eine abschließende Bewertung erfolgen, um eine sinnvolle, auf den Betrieb ausgerichtete Festlegung zu treffen, die ggf. auch in Multi-Repräsentationsmodellen mündet. Gleiches gilt für die semantische Information. Diese kann z. B. aus den bestehenden Datenbanken der Betriebsführung wie WInD entnommen und den Bauelementen im Modell hinzugefügt werden. Andere Modelle sehen das Verbleiben der semantischen Daten in ihren bisherigen Datenbanken vor, um darauf basierende Anwendungen (z. B. WInD) weiter nutzen zu können und gleichzeitig die redundante Speicherung von semantischen Daten zu vermeiden. Man spricht dann von Linked Data bzw. Multimodellen. So in der einen oder anderen Weise miteinander verknüpfte Geometrie und Semantik kann schließlich z. B. in BIM-Viewern visualisiert werden. Auch die für die Zwecke der WSV optimale Art der Verknüpfung der Systeme bedarf noch weitere Anforderungsanalysen und Untersuchungen.

Es zeigt sich auch, dass die Festlegung nach den Fertigstellungsgraden aus der Neuplanung für die genannten Zwecke der WSV nicht zielführend ist. Vielmehr ist eine Festlegung bezogen auf die Zwecke des Betriebes, deren Grundlage immer die Dokumentation des tatsächlichen Ist-Zustandes (As-is-Dokumentation) sein muss, sinnvoll. Grade der As-is-Dokumentation bietet der Level of As-is Documentation (LOAD) bestehend aus einem geometrischen (Level of As-is Geometry, LOAG) und einem semantischen Anteil (Level of As-is Information) (Becker et al. (2019), Wollenberg (2018)). Außerdem muss eine Aussage zur angestrebten bzw. erreichten Genauigkeit (Level of Accuracy, LOA) getroffen werden, mit der jedes Messverfahren behaftet ist. Auch die Modellierung approximiert die zu Grunde liegende Laserscanning-Punktwolke mit einer bestimmten Genauigkeit. Sowohl LOAD als auch LOA sollten zwischen den Beteiligten in den sogenannten Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) fest vereinbart werden.

Die zweite Schleusenkammer der Schleuse Trier (Abbildung 4) wurde im Rahmen dieses Projektes mit einem terrestrischen Laserscanner mit aufgesetzter Kamera und ergänzend mit einer kameraausgestatteten Drohne vermessen (Abbildung 5). Auf ca. 175 Scanpositionen entstanden ca. 1,3 Mrd. Punkte und ca. 1200 Fotos mit einem Datenvolumen von insgesamt ca. 23 GB).



Abbildung 4: Das Untersuchungsobjekt „Neue Schleuse Trier“

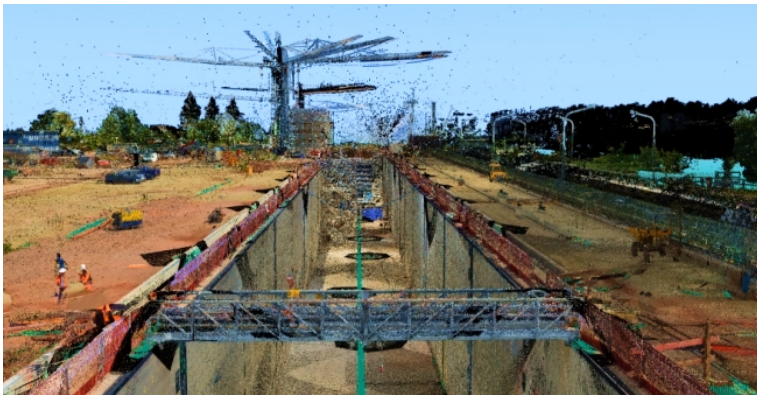


Abbildung 5: Geodätische Bestandsaufnahme

Die Bauwerksmodellierung für das BIM-Modell in verschiedenen LOAG erfolgte mit der um das Modul PHIDIAS (PHOCAD 2019) ergänzten Software Bentley AECOSim Building Designer. PHIDIAS ermöglicht eine kombinierte Auswertung der Laserscanner- und Bilddaten unter Nutzung der Vorteile der jeweiligen Datenarten und insbesondere des Vorteils einer gemeinsamen Verwendung. Die Modellierung erfolgte in verschiedenen geometrischen Detailgraden (LOAG), um eine Beurteilungsgrundlage für eine spätere Bewer-

tung der für die Zwecke der WSV sinnvollen LOAG zu erhalten. Ausschnitte der Modelle zeigt Abbildung 6.

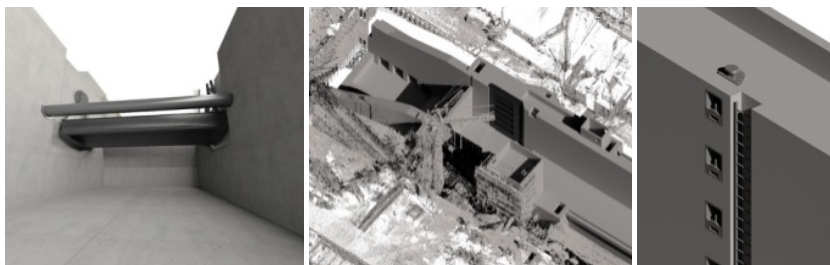


Abbildung 6: Ausschnitte aus dem As-is-Modell

Mit den erstellten As-is-Modellen können Visualisierungen und Analysen z. B. über die Ebenheit von Kammerwänden oder des Kammerbodens in Form von farbkodierten Darstellungen (Abbildung 7) oder Vergleiche zum aus der Planung vorliegenden Ausführungsmodell (as-built vs. as-planned) erstellt werden, aus denen dann Entscheidungen bezüglich der Betriebsführung abgeleitet werden können.

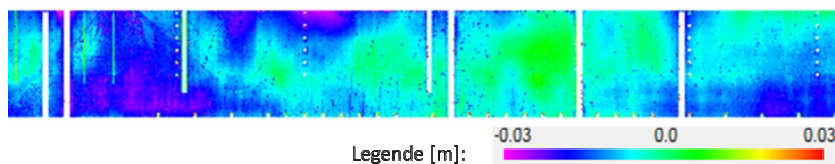


Abbildung 7: Farbkodierte Darstellung der Abstände der Punkte des Laserscans zur modellierten Kammerwand

Zuletzt stellt sich noch die Frage nach den verwendeten Koordinatenreferenzsystemen. Planungen erfolgen in der Infrastruktur wegen ihrer großen Ausdehnung in geodätischen Koordinatenreferenzsystemen, bei Bauwerken in einem lokalen Koordinatensystem. Spätestens seit Einführung des ETRS89/UTMxx-Systems ergeben sich durch die Abbildungsverzerrung signifikante Korrekturgrößen von bis zu 40 cm/km zur Örtlichkeit. Hinzu kommt die Höhenreduktion. Im Fall der Neuen Schleuse Trier addieren sie sich bei einer Länge von 500 m zu ca. 3 bis 4 cm auf. Dabei muss gesehen werden, dass die Lage Triers zum Hauptmeridian des Abbildungsstreifens relativ günstig und die Höhenlage mit ca. 130 m über NHN relativ gering ist.

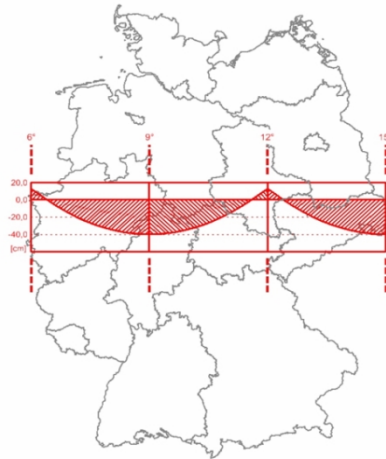


Abbildung 8: UTM-Abbildungsreduktion in cm/km

5 Erfahrungen

BIM ist eine digitale Arbeitsmethodik für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, auch für die Betriebsphase – Wartungen, Umbauten oder Ertüchtigungen. Als zentrale Datenbank und Dokumentationsgrundlage kann BIM die Basis für die Bewirtschaftung und den Betrieb des Bauwerks darstellen. Voraussetzung sind aktuelle, in geometrischer wie semantischer Detailliertheit (LOAD) auf die Anwendung abgestimmte As-built- bzw. As-is-Modelle. Für bestehende Bauwerke ohne vorhandenes BIM-Modell muss ein „BIM“-gerechtes Aufmaß und eine daraus abgeleitete Erstmodellierung erfolgen. Die geometrischen Modelle müssen mit den notwendigen semantischen Informationen versehen oder verknüpft werden. Essentiell sind dabei geeignete Objektkataloge.

Das Initialprojekt Neue Schleuse Trier zeigt eine prototypische Umsetzung für BIM im Bestand vom Aufmaß bis zur Erstellung eines geeigneten As-is- (Bestands-)modells als Basis für die künftige Bewirtschaftung. Unter Hinzunahme bewirtschaftungs- und betriebsrelevanter Daten können künftig Wartungszyklen und die damit einhergehenden Kosten geplant werden (5D-BIM). Denkbar ist auch die Umsetzung des Modells in die Umgebung einer virtuellen Realität (VR), um in dieser z. B. Inspektionen und Analysen durchführen zu können, ohne physisch vor Ort sein zu müssen.

Wegen ihrer oftmals großen räumlichen Ausdehnung sind bei Infrastrukturprojekten an der Wasserstraße zudem Fragen der Georeferenzierung (örtlich-kartesisch vs. geodätisch) zu beachten und weiter zu untersuchen. Dies gilt insbesondere bei geodätischen Koordinatenreferenzsystemen wie ETRS89/UTMxx, bei denen sich Abbildungsverzerrung und Höhenreduktion zu signifikanten Größen addieren.

6 Literatur

- Becker, R.; Lublasser, E.; Martens, J.; Wollenberg, R.; Zhang, H.; Brell-Cokcan, S.; Blankenbach, J. (2019): Enabling BIM for Property Management of Existing Buildings Based on Automated As-is Capturing. In: Proceedings of the 36th ISARC, Banff, Alberta, Canada. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0028>
- Bentley (2019): <https://www.bentley.com/de/products/product-line/building-design-software/openbuildings-designer>
- Bödefeld, J. (2017): Digitalisierung im Verkehrswasserbau.
- Bundesregierung (2018): Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode
- PHOCAD (2019): <http://www.phocad.de/en/PHIDIAS/phidias.html>
- Wollenberg, R. (2018): BIM für das Bestandsimmobilienmanagement. In.: Steiner, M., Theiler, M., Mirboland, M.: 30. Forum Bauinformatik. Bauhaus-Universität Weimar. <https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet>

Autoren:

Dr. Ralf Becker

Sigfrid Knapp

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für
Bauinformatik & Geoinformations-
systeme
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
Referat Numerische Verfahren im
Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 241 80-95300

Tel.: +49 721 9726-4550

Fax: +49 241 80-92142

Fax: +49 721 9726-4770

E-Mail: ralf.becker@gia.rwth-aachen.de

E-Mail: sigfrid.knapp@baw.de

BIM Collaboration – Digitale und interdisziplinäre Zusammenarbeit in openBIM Projekten

Sven Oettinghaus

BIM, eine kooperative Arbeitsmethode, fördert die interdisziplinäre Zusammenarbeit in Projekten. Grundlage bildet meist ein dreidimensionales Modell, welches alle relevanten Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes verwaltet.

Aufgrund der modellbasierten Kommunikation unter allen Planungsbeteiligten können Probleme effizient und größtenteils ohne Missverständnisse gelöst werden. Ferner ist eine Auswertung der Kommunikation beispielsweise hinsichtlich offener Planungsaufgaben jederzeit möglich. Der Austausch von Daten erfolgt zentralisiert in offenen, herstellerneutralen, Datenformaten wie IFC und BCF.

Stichworte: BIM, Collaboration, IFC, BCF, openBIM

1 Building Information Modeling

1.1 Allgemeines

Die Methode Building Information Modeling (BIM) steht u.a. für digitales Bauen und, damit verbunden, auch für digitale Planungsprozesse. Je konsequenter begleitende Prozesse im Sinne der Methodik umgesetzt werden, desto effizienter und zielführender können diese angewendet werden. In der Regel dient als Grundlage ein dreidimensionales Modell, welches alle relevanten Informationen enthält und über welches der Lebenszyklus eines Bauwerkes verwaltet wird.

In einem Wasserbauprojekt sind in der Regel eine Vielzahl verschiedener Fachplaner, in Abhängigkeit der jeweiligen Planungs- bzw. Ausführungsphase, aus unterschiedlichen Unternehmen, zeitgleich tätig. Es sind kontinuierlich Abstimmung und Koordinierung der Planungen untereinander erforderlich. Mit BIM kann diese interdisziplinäre Zusammenarbeit vereinfacht und

optimiert werden, denn die Methode bringt eine Kommunikation über einen zentralen Punkt mit sich. Ein wichtiger Unterschied zu einem klassischen Projekt sind die Kommunikationswege (vgl. Abbildung 1). Die Interoperabilität der BIM-Methodik ermöglicht einen effizienteren Weg der Kommunikation, da jedem Beteiligten zu jeder Zeit alle aktuellen Informationen zur Verfügung stehen. Diese Informationen existieren zudem nur einmal, auch Single-Source-of-Truth (vgl. Abschnitt 2.4) genannt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass jedem immer die aktuell gültigen Informationen zur Verfügung stehen. Diese Informationen können den Objekten eines Modelles zusätzlich zu den integrierten semantischen und geometrischen Objektinformationen, zugeordnet werden.

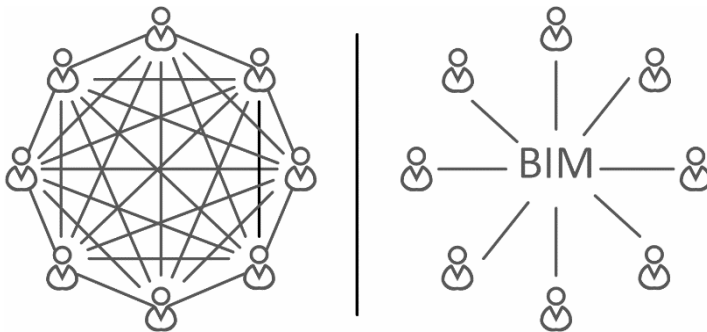


Abbildung 1: (links) konventionelle Planung (rechts) Planung mit BIM

1.2 OpenBIM

In der Methodik wird u.a. zwischen closedBIM und openBIM unterschieden. Definiert wird dies über die Möglichkeit der Art und Weise Daten unter Projektbeteiligten auszutauschen. Bei closedBIM erfolgt ein Austausch in proprietären Dateiformaten. Die Daten sind in diesem Fall meist nur mit dem gleichen Autorensystem lesbar, denn jeder Softwarehersteller hat sein eigenes natives Dateiformat. Eine effektive Zusammenarbeit ist dann meist nur möglich, wenn alle Projektbeteiligten im gleichen Softwaresystem arbeiten.

Bei openBIM hingegen erfolgt der Austausch von Daten und Informationen untereinander in dem offenen Dateiformat IFC (Industry Foundation Class). Dieses standardisierte Austauschformat, auf Basis von XML, ermöglicht einen

herstellerneutralen Austausch unter den Projektbeteiligten, unabhängig vom verwendeten Autorensystem.

Ferner ist es möglich den Informationsgehalt entsprechend der Erfordernissen des Projektpartners anzupassen, so dass dieser auch nur die für ihn relevanten Informationen erhält. Beispielsweise benötigt der Statiker nur tragende Bauteile und keine Ausbauten.

1.3 BIM-Rollen

Für eine erfolgreiche Umsetzung von BIM-Projekten sind auch spezielle Rollen und Verantwortlichkeiten festzulegen.

Jedes Fachmodell wird durch einen BIM-Modellierer erstellt und betreut. Ein BIM-Koordinator je Fachdisziplin oder auch Auftragnehmer überwacht die Erstellung der Modelle und überprüft die Übereinstimmung mit den vertraglichen Vereinbarungen (vgl. Abschnitt 1.4).

Der BIM-Gesamtkoordinator, auf der Auftragnehmer-Seite, führt alle Modelle zu einem Koordinationsmodell zusammen und prüft ebenfalls die Einhaltung der vertraglichen Vereinbarungen und führt weitere Qualitätssicherungen sowie u.a. Kollisionsprüfungen durch.

Auf der Seite des Auftraggebers befindet sich der BIM Manager, welcher das Projekt im Rahmen der Methode steuert und überwacht sowie den Auftraggeber bei der Erstellung der vertraglichen Vereinbarungen für die Anwendung von BIM unterstützt.

1.4 Vertragliche Vereinbarungen

Damit die Seite des Auftraggebers weiß, was sie bekommt und die Seite des Auftragnehmers weiß, was sie leisten muss, sind im Rahmen von BIM weitere vertragliche Vereinbarungen erforderlich. Die wichtigsten Dokumente sind dabei die Auftraggeber-Informationsanforderung (AIA) und der BIM-Abwicklungsplan (BAP).

Im AIA, eine Art Pflichtenheft definiert der Auftraggeber seine Anforderungen an das Projekt. Das können zum einen die verfolgten BIM-Ziele sein, aber auch die gewünschten Datenformate und Detaillierungsgrade (Level-of-Development, LOD) in Abhängigkeit von der Leistungsphase.

Der Auftragnehmer beschreibt im BAP auf Grundlage der AIA mit welchen Anwendungsfällen er die AIA umsetzen wird und zu welchen Zeitpunkten er welche Daten auf die gewünschte Art und Weise und im geforderten Detaillierungsgrad übergibt. Auch das Issue-Management (vgl. Abschnitt 2.2) wird hier definiert.

AIA und BAP regeln unter anderem auch die gemeinsame Zusammenarbeit und Datenumgebung, einschließlich der zu verwendenden Datenformate.

2 BIM Collaboration

2.1 Modellbasierte Kommunikation

Laut verschiedenster Definitionen der BIM-Methode, wie beispielsweise im Stufenplan des BMVI (2010), ist BIM eine „kooperative Arbeitsmethode“ auf „Grundlage eines dreidimensionalen Gebäudemodells“. Daher kann auch von einer modellbasierten Kommunikation gesprochen werden, denn alles in einem Projekt, angefangen von Vertragsverwaltung, Planungsentscheidungen, Änderungen oder Konflikten, bis hin zu Plänen können in einem Modell verwaltet werden, welches zugleich die sogenannte Single-Source-of-Truth (SSOT) (vgl. Abschnitt 2.4) bildet.

Je nach Anwendungsfall und damit verbundenen Daten sind neben dem objektorientierten dreidimensionalen Bauwerksmodell auch weitere softwaretechnische Lösungen erforderlich, zum einen für ein zentralisiertes Arbeiten zum anderen zur Verknüpfung von weiteren Daten wie Dokumenten mit dem Modell. In diesem Fall ist ein Common Data Environment erforderlich (vgl. Abschnitt 2.3).

Es ist zudem möglich Absprachen und Entscheidungen sowie Probleme und offene Punkte im Modell zentral zu verwalten. Bei dem sogenannten Issue-Management (vgl. Abschnitt 2.2) können neben der eigentlichen Beschreibung als freier Text zusätzlich weitere Attribute, wie beispielsweise Priorität und Zuständigkeit sowie eine Frist, definiert werden. Dieses Verfahren wurde im Sinne des openBIM Prozesses standardisiert, so kann über das offene Dateiformat „BCF“ (BIM Collaboration Format, vgl. Abschnitt 2.3) ein Plattformübergreifender und Software unabhängiger Datenaustausch von Issues erfolgen.


2.2 Issue-Management


Das Anwendungsgebiet für das „Issue-Management“ ist umfangreich. Es eignet sich beispielsweise zum Protokollieren von Absprachen während einer Planungsbesprechung sowohl intern als auch zusammen mit dem Kunden. Der Vorteil ist, dass alle Entscheidungen einen festen Bezug zu einem Objekt der Planung haben und für alle transparent an einer Stelle (SSOT) gespeichert werden.

Es lassen sich auch die Ergebnisse von Prüfungen der Planung über das Issue-Management verwalten. Die bekannteste Art und Weise einer Prüfung ist die automatisierte Kollisionsprüfung (vgl. Abbildung 2). Bei dieser werden Objekte, identifiziert anhand ihrer Attribute, hinsichtlich möglicher geometrischer Kollisionen geprüft. Die Regeln sind frei definierbar und funktionieren automatisiert, sofern die Erstellung der Objekte gemäß des BAPs (vgl. Abschnitt 1.4) erfolgt ist. Die Überprüfung der Einhaltung der Vorgaben obliegt zum einen den Modellierern und zum anderen den BIM-Koordinatoren bzw. dem BIM-Gesamtkoordinator.


Σ






ERGEBNISÜBERSICHT





Bericht




					
Problemanzahl	37	1	0	0	0
Problemdichte	16	0.43	0	0	0


△


ERGEBNISSE


Keine Filterung

Automatisch












Ergebnisse




Abgehängte Decke zu nah an der Komponente Fenster [0/2]




Fenster zu nah an der Komponente Fenster [0/1]



Stütze zu nah an der Komponente Fenster [0/28]



Stütze, Wand, Fenster zu nah an der Komponente Fenster [0/2]



Wand, Fenster zu nah an der Komponente Fenster [0/4]

Abbildung 2: Ergebnisbericht einer automatisierten Kollisionsprüfung

Wird eine Kollision erkannt, so wird diese in einem Issue festgehalten (vgl. Abbildung 3). Das Issue enthält Informationen, wie die Beschreibung der Kollision. Des Weiteren werden Verantwortlichkeiten und Fristen definiert. Auch ein Bildschirmausschnitt der Kollision liegt dem Issue bei. Zusätzlich werden zudem noch die GUID („Globally Unique Identifier“, eine eindeutige Identifikationsnummer eines einzelnen Objektes) sowie die aktuelle Modellposition und Ansicht mitgespeichert. Zudem ist es möglich weitere Dokumente, Texte oder auch Priorisierung mit dem Issue zu sichern. Anschließend erfolgt der Austausch der Issues über das BCF-Format, im besten Fall über eine

CDE (vgl. Abschnitt 2.5) oder über eine spezielle Cloudlösung. So wird gewährleistet, dass jeder Projektbeteiligte zu jederzeit einen Überblick über die ihn betreffenden Issues bekommen kann. Betroffene Fachplaner werden zudem auf Wunsch per Mail über ein neues vorliegendes Issue informiert.

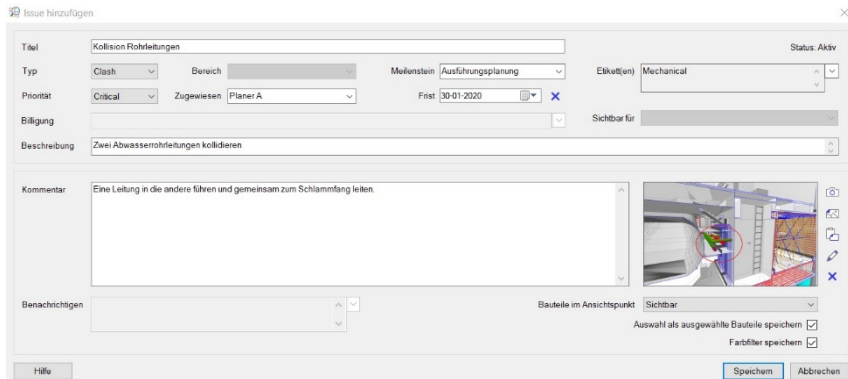


Abbildung 3: Ein Issue zu einer erkannten Kollision

Der Empfänger des Issues erhält alle zuvor vom Koordinator eingebenden Informationen. Zusätzlich wird der Empfänger mit Auswahl des Issues zur Problemstelle geführt und erhält in seinem Modell dieselbe Ansicht, wie sie der Prüfer zuvor gesehen hat. Dabei ist nicht nur derselbe Blickwinkel übermittelt, sondern auch die Modelzuschnitte und ausgeblendeten Elemente. Dies ist vorteilhaft, da so eine unmissverständliche Darstellung des Problems erfolgt.

Während der Bearbeitung eines Issues verändert sich der Status von „offen“ zu „in Bearbeitung“. Ist die Bearbeitung abgeschlossen kann der Status auf „erledigt“ geändert werden. Durch eine erneute abschließende Prüfung durch den BIM-Gesamtkoordinator kann das Issue anschließend „geschlossen“ werden, sofern alle Kollisionen gelöst worden sind. Der Wechsel der Status wird protokolliert und lässt sich wie alle anderen Informationen auch jederzeit über ein Dash-Board (vgl. Abbildung 4) in Echtzeit abfragen. Dies ermöglicht ein viel effizienteres Projektmanagement, da alle Information in der SSOT liegen.

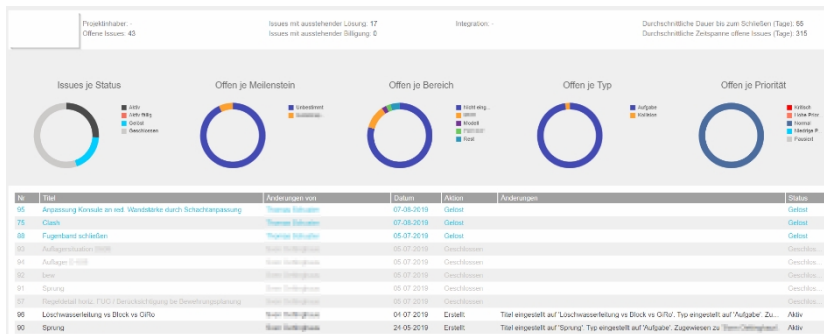


Abbildung 4: Dashboard eines openBIM Projektes

2.3 BIM Collaboration Format - BCF

Das BIM Collaboration Format (BCF) ist ein offenes Datenformat auf XML-Basis, vergleichbar mit IFC. Dieses Datenformat wurde speziell für die digitale Zusammenarbeit mit BIM entwickelt und ebenfalls standardisiert. Die Standardisierung wird vor allem durch den Verein „BuildingSmart“ weltweit vorangetrieben. Um eine Kompatibilität unter den verschiedenen Softwaresystemen möglichst reibungslos zu gewährleisten, beteiligen sich die meisten Softwarehersteller an der Entwicklung und Implementierung der freien Schnittstelle.

2.4 Single-Source-of-Truth - SSOT

Für die effiziente Anwendung von BIM ist es entscheidend, dass die Daten nicht gestreut und redundant vorgehalten werden, sondern zentral und einmalig für alle Beteiligten erreichbar. In diesem Fall wird von einer „Single-Source-of-Truth“ (SSOT) gesprochen. Dieses Vorgehen gewährleistet, dass jeder Projektbeteiligte zu jedem Zeitpunkt alle für ihn relevanten Daten aktuell abrufen und verwenden kann.

Es wird jedoch meist noch zwischen einer CDE für alle Projektbeteiligten und der für den Fachplaner selbst unterschieden. Denn es wird nicht jeder Planungs- und Bearbeitungsstand sofort mit allen Beteiligten geteilt. Erst mit einem definierten Reifegrad und erfolgter Qualitätssicherung werden die Daten zentral für alle verbindlich veröffentlicht.

2.5 CDE - Common Data Environment

Common Data Environment (CDE) steht für eine gemeinsame Datenumgebung, eine Art digitaler Projektraum. In dieser Datenumgebung werden sämtliche Projektinformationen im Sinn der SSOT abgelegt und zentral verwaltet. Der Zugriff und die Nutzung ist abhängig von den definierbaren Benutzerberechtigungen und Projektrollen. Neben den BIM-Modellen zusammengeführt zu einem Gesamtmodell, ist dort die Verwaltung von Plänen und unterschiedlichsten Dokumenten möglich. Häufig ist eine CDE ein webbasiertes Cloud-Produkt, so dass alle Beteiligten unabhängig von ihren eigenen Systemen und Netzwerken sowie internen Sicherheitsvorschriften Zugriff auf die Daten haben. Sicherheitsvorschriften wie der Serverstandort, können die Auswahl der möglichen Systeme einschränken. Viele Systeme stellen auch einen webbasierten Viewer für die Modelle zur Verfügung, so dass nicht jeder Projektbeteiligte über spezielle Software und entsprechende Softwarekenntnisse verfügen muss. Die nachfolgende Abbildung 5 soll die schematische Funktionsweise einer CDE und des darüber erfolgenden Datenaustausches mit openBIM darstellen.

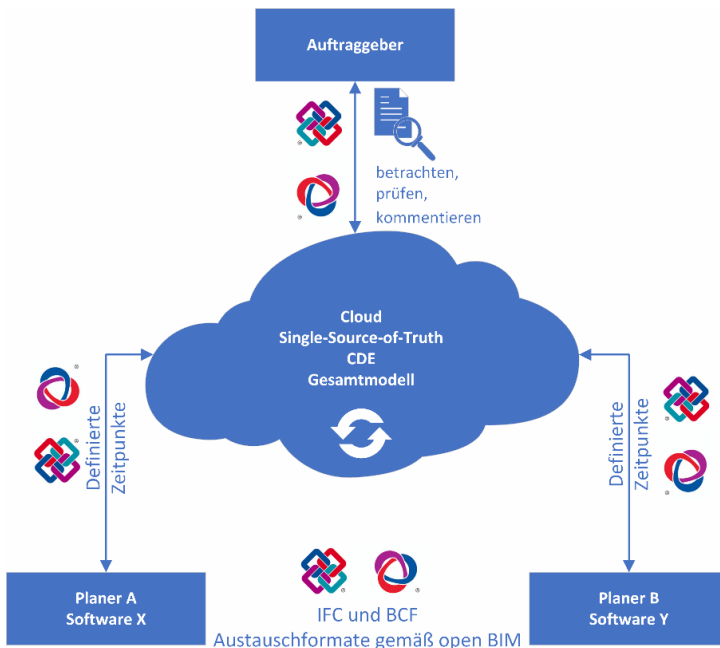


Abbildung 5: CDE mit OpenBIM Workflow

3 Fazit

Die Zusammenarbeit in interdisziplinären Projekten kann durch die Anwendung von BIM effizienter gestaltet werden als die konventionelle Arbeitsweise es ermöglicht. Durch eine Datenumgebung, wie eine CDE, kann im Sinne der Single-Source-of-Truth eine zentralisierte Datenablage erfolgen. Damit stehen allen Beteiligten jederzeit die aktuellen und somit gültigen Daten zur Verfügung. Durch die Nutzung von openBIM Dateiformaten wie IFC und BFC ist zudem ein vom Softwarehersteller unabhängiger Austausch von Daten möglich.

Das Issue-Management, als ein Anwendungsfall der BIM-Methodik, ermöglicht die modellbasierte Kommunikation. So kann eine unmissverständliche visuelle Darstellung des Problems, beispielsweise einer geometrischen Kollision, über ein Issue mit den betroffenen Fachplanern geteilt und einem zur Lösung zugewiesen werden.

Zusätzliche vertragliche Vereinbarungen, wie BAP und AIA, definieren u.a. LOD und BIM-Rollen, und bilden die Basis für einen strukturierten Projektablauf.

4 Literatur

BMVI (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Über:
<https://www.bmvi.de/goto?id=230208> (aufgerufen am 14.01.2020)

Autor:

Sven Oettinghaus, M. Sc.

Tractebel Engineering GmbH
Friedberger Strasse 173
61118 Bad Vilbel

Tel.: +49 6101 551241
E-Mail: sven.oettinghaus@tractebel.engie.com

Von der Richtlinie zur Maßnahmenoptimierung

Prof. Dr. Gabriele Gönnert
Jan-Moritz Müller

Der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) Hamburg hat für die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie zahlreiche hydrodynamisch-numerische Modelle aufgebaut, die seitdem gezielt zur Entwicklung und Optimierung von Maßnahmen für die Reduzierung des Überschwemmungsrisikos und zur hochwasserneutralen ökologischen Aufwertung der Gewässer eingesetzt werden.

1 Einleitung

Im Rahmen der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL) sind die Länder aufgefordert, zunächst Risikogebiete für ein 200-jähriges und anschließend Überschwemmungsgebiete (ÜSG) für ein 100-jähriges Hochwasserereignis zu ermitteln und auszuweisen. Hieraus ergeben sich Maßnahmen zur Reduzierung des Hochwasserrisikos. Zudem werden im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie eine Vielzahl von Eingriffen und Veränderungen im Flusslauf vorgenommen. Maßnahmen erfordern eine gezielte Planung in Hinblick auf das anzustrebende Ziel und Nachweise zur Hochwasserneutralität.

Zur Umsetzung der HWRM-RL hat der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) Hamburg zahlreiche hydrodynamisch-numerische 2D-Modelle mit dem Modellsystem Delft3D Flexible Mesh aufgebaut. Bei der Planung der Maßnahmen spielen die beim Landesbetrieb aufgebauten hydrodynamisch-numerischen Modelle eine zentrale Rolle.

2 Methodik

Simulationen für ÜSG-Ausweisungen und Wirksamkeitsnachweise in Machbarkeitsstudien werden beim LSBG mit hydrodynamisch-numerischen 2D-Modellen durchgeführt. Für diese Untersuchungen wird das hydrodynamisch-numerische Modell Delft3D Flexible Mesh von Deltares (Delft, NL) verwendet. Das Modell kann zwei- und dreidimensionale instationäre Hydrodynamik sowie Stofftransporte simulieren (Deltares 2019). Die Modellierung der Hamburger Fließgewässer als Grundlage für die Ausweisung der Überschwemmungsgebiete erfolgt im zweidimensionalen Modell und basiert auf der Finite- Volumen- Methode. Zur Abbildung der Topographie werden im Modell unstrukturierte Rechengitter, bestehend aus Rechtecken und Dreiecken, verwendet. Mit diesen variablen Elementen lassen sich die teilweise sehr kleinteiligen Gewässerstrukturen, wie sie an den Hamburger Gewässern auftreten, genau abbilden. Der Detaillierungsgrad der räumlichen Diskretisierung hängt dabei von der Variabilität der Gelände- und Gewässerstruktur sowie den im Modell zu berücksichtigenden Bauwerken ab. Gebäude werden, abhängig von der zu bearbeitenden Fragestellung, aus den Rechengittern ausgestanzt. Hierdurch ist sichergestellt, dass die Simulationen ein möglichst realistisches und in ihrer Aussagekraft belastbares Ergebnis liefern.

Die Bandbreite der beim Landesbetrieb betriebenen hydrodynamisch-numerischen Gewässermodelle erstreckt sich vom Falkengraben, einem sehr kleinen Gewässer von teilweise unter 1 m Breite, bis hin zur Tideelbe mit mehr als 15 km Breite im Mündungsbereich. Aufbau und Bearbeitung der Modelle erfordert daher ein hohes Maß an Fachexpertise bei der hydrodynamisch-numerischen Gewässermodellierung. Mit der wachsenden Anzahl der aufgebauten Gewässermodelle ergibt sich auch zunehmend die Möglichkeit der Koppelung einzelner Modelle und somit dem Zusammenfügen von Einzelgewässern zu einem Gewässernetz. Hierbei stellt die teilweise sehr unterschiedliche Dimensionierung der Gewässer eine besondere Herausforderung dar. Nicht nur in dieser Hinsicht hat es sich als besonders hilfreich und effizient erwiesen, dass der Landesbetrieb im Fachbereich Planung und Entwurf Gewässer des Geschäftsbereichs Gewässer und Hochwasserschutz ein eigenes Team zur Gewässermodellierung aufgebaut hat. Das selbstständige Bearbeiten der Gewässermodellierung im Hause des Landesbetriebes führt zu einer konsistenten, gewässerübergreifenden Vorgehensweise. Darüber hinaus führt die zentrale Bearbeitung dazu, dass Eingriffe ins Gewässer, die modelltechnische Nachweise erfordern, immer zentral gesammelt sind. Hierdurch sind die Modelle stets auf dem aktuellen Stand, was wiederum

dazu führt, dass die Aktualisierung der Modelle für den nächsten Überprüfungszyklus der HWRM-RL deutlich erleichtert wird.

Beispiele für bereits in den letzten Jahren durchgeführte Untersuchungen sind unter anderem die Wirkungsnachweise eines geplanten Schöpfwerkes in den Hamburger Vier- und Marschlanden, die Reduzierung des Überschwemmungsrisikos an der Berner Au durch Erweiterungen von bestehenden Hochwasserrückhaltebecken (HRB) am Gewässer, die Untersuchung der Auswirkungen einer Optimierung zweier HRB am Falkengraben, sowie die Prüfung der ökologischen Durchgängigkeit der Alsterschleusen.

Als Ergebnis werden in erster Linie Wasserstandsganglinien, in Karten dargestellte Gewässer- und Überschwemmungsflächen und animierte Filme des modellierten Abflussgeschehens erzeugt. Gerade letztere haben sich bei Öffentlichkeitsveranstaltungen als äußerst überzeugende Darstellungsform erwiesen.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Beispiele vorgestellt.

3 Ausgewählte Beispiele

3.1 Berner Au

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zur Reduzierung des Überschwemmungsgebietes der Berner Au wurden diverse Modellvarianten bezüglich der Positionierung, Ausdehnung, Dimensionierung und hydraulischen Wirksamkeit geprüft. Der Fokus der Untersuchung lag dabei auf den beiden oberen der insgesamt 3 bestehenden HRB. Die Wirksamkeit der Untersuchungsvarianten zur Erweiterung der HRB wurde für ein HQ10 und HQ100 nachgewiesen. Bei den verschiedenen Varianten wurden entweder Teilabschnitte oder größere Flächen der Geländehöhe so angepasst, dass neuer Retentionsraum entsteht. Hierbei muss das Zusammenspiel von wirtschaftlichem Nutzen, technischem Aufwand und Auswirkung auf das Retentionsvolumen bereits während der Modellierung berücksichtigt werden.

Die Bewertung der einzelnen untersuchten Varianten wurde anhand des Vergleiches der Anzahl im Falle eines extremen Hochwasserereignisses durch die Überschwemmung betroffenen Gebäude, sowie der Größe der überschwemmten Fläche zum Referenzzustand durchgeführt.

Den Ergebnissen der Untersuchung zum ÜSG Berner Au kann zusammenfassend entnommen werden, dass die Maßnahmen bei den beiden untersuchten HRB deutlich unterschiedliche Auswirkungen sowohl auf den Wasserstand als auch auf die Größe der überschwemmten Fläche entlang der Berner Au haben. Insgesamt können die größten Wasserstandsabsenkungen und Verkleinerungen der überschwemmten Fläche im Falle eines HQ100 mittels Trockenbeckenerweiterung an einem der beiden HRB erreicht werden. Unter Zuhilfenahme des 2D-Modells konnte somit geprüft werden im welchen Bereich des Untersuchungsgebiet eine Erweiterung bestehender HRB zur Erhöhung des Retentionsvolumens an der Berner Au beitragen. Eine mögliche Option zur weiteren Planung ist die naturnahe Gestaltung von trockenen oder wechselfeuchten HRB, angelehnt an die Ergebnisse des beim LSBG durchgeführten Forschungsprojektes Stuck (LSBG, 2017)

Bei der Bearbeitung des Projektes hat sich von großem Vorteil erwiesen, dass Gebiet und Gewässer bei den Bearbeitern bereits durch die Ausweisung der ÜSG gut bekannt waren. So konnten beispielsweise bestimmte Flächen von vornherein ausgeschlossen werden. Auch Einlass- und Auslassbauwerke in die Erweiterungsflächen konnten optimal positioniert werden. Auch die Einbindung der Kollegen aus dem Forschungsprojekt Stuck war zu jedem Bearbeitungsschritt unkompliziert möglich. So ist es gelungen, hydraulisch hoch wirksame und gleichzeitig realisierbare und ökologisch wertvolle Varianten zu entwickeln und vorzulegen.

Die Frage der Umsetzung befindet sich derzeit in der politischen Entscheidungsphase.

3.2 Alster

Die Wiederherstellung der Durchgängigkeit oberirdischer Gewässer ist im § 34 Wasserhaushaltsgesetz geregelt und von der EU-Wasserrahmenrichtlinie gefordert. Die Alster wird von der Quelle bis zur Mündung in die Elbe durch mehrere Schleusen- und Wehrbauwerke angestaut. Diese Bauwerke stellen ein unüberwindbares Hindernis für Fische und wirbellose aquatische Lebewesen dar, deren Ausbreitung und Neubesiedlung somit behindert wird. Im Rahmen der Grundinstandsetzung dreier Wehranlagen entlang der Alster stellt der LSBG durch den geplanten Bau von Fischaufstiegsanlagen die ökologische Durchgängigkeit an diesen Wehranlagen her. Um den Fischen den Aufstieg zu ermöglichen, müssen die Sohlen an den entsprechenden Stellen mit kleinen überwindbaren treppenartigen Höhenstufen ansteigen. Hierzu

werden die Sohlen aufgefüllt und mit Natursteinen und Natursteinquerriegeln (Höhenstufen) ausgelegt. So können die erforderlichen unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten erzeugt werden, die die Fisch-Wanderung ermöglichen und vielen aquatischen Lebewesen Lebensraum bieten (z. B. Muscheln, Krebsen, Insekten).

Diese baulichen Veränderungen im Gewässer dürfen nach Wasserhaushaltsgesetz §78 keine Verschlechterung der Hochwasserabfuhr hervorrufen. Um dies nachzuweisen, erstellt der LSBG ein hydrodynamisch-numerisches 2D-Modell für die Alster sowohl in ihrem bestehenden Zustand als auch für den Planungszustand. Die Planungsvariante wird durch angepasste Geländehöhen und Bauwerke im Modell nachgebildet. Die Modellierung ermöglicht einen Vergleich der Ausdehnung der überschwemmten Fläche vom Ist-Zustand gegenüber dem Planungszustand. Darüber hinaus wird das 2D-Modell eingesetzt um Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten und Durchflüsse für Q30 und Q330 in der Fischaufstiegsanlage zu untersuchen und somit die Qualitätssicherung nach DWA-M 509 bereits während der Planungsphase zu sichern. Beispielsweise können hierdurch Anströmverhältnisse im Oberwasser der Anlage, Rückstaueffekte im Unterwasser oder die Ausbildung von Leitströmung im Unterwasser untersucht werden.

Teile der Maßnahme befinden sich bereits in der Umsetzung.

3.3 Falkengraben

Der Falkengraben im Bezirk Hamburg-Harburg ist ein kleines Gewässer mit einem verhältnismäßig großen gesetzlich festgesetzten ÜSG. Zur Reduzierung des Überflutungsrisikos wurde der LSBG beauftragt, das für die Ausweisung des ÜSG aufgebaute hydrodynamisch-numerische 2D-Modell zu erweitern und die hydraulische Optimierung zweier HRB zu rechnen. Hierbei bestand die besondere Aufgabe darin, eines der beiden HRB so in der Geländeprofilierung zu gestalten, dass eine Nutzung als Freizeitfläche, z.B. als Fußballplatz oder für andere Freizeitaktivitäten, zukünftig möglich ist und gleichzeitig das Hochwasserrisiko unterhalb des Beckens deutlich gesenkt wird. Mit Hilfe der Modellierung konnten die Planungen so angepasst werden, dass mit geringen Veränderungen, wie der Verlegung des Einlassbauwerkes und einer Optimierung des Auslassbauwerkes, bei gleichzeitig eine höhere Effizienz der Maßnahme erzielt werden kann.

Die detaillierte Planung der modellierten Maßnahmen ist vorgesehen.

3.4 Vier- und Marschlande

In einer weiteren Machbarkeitsstudie, die mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen 2D-Modells beim LSBG durchgeführt wurde, sind Wirkungsnachweise eines Schöpfwerkes im Gebiet der Vier- und Marschlande östlich der Hamburger Innenstadt errechnet worden. Ist in diesem Gebiet der Außenwasserstand der Tideelbe bei Tideniedrigwasser höher als in der Wasserstand der unteren Dove-Elbe im hochwassergeschützten Bereich hinter dem Deichen und Schöpfwerken, ergibt sich eine Sperrtide, bei der die untere Dove-Elbe nicht in die Tideelbe entwässert werden kann. Bis zum nächsten Tideniedrigwasser steigt der Wasserstand somit weiter an und es drohen Überschwemmungen durch Binnenhochwasser. Vor diesem Hintergrund wird die Planung eines Schöpfwerkes in Erwägung gezogen, das in die Elbe entwässert und dadurch zur Entlastung der Gewässer hinter den Deichen im Binnenhochwasserfall beiträgt.

Für das Planungsfeststellungsverfahren bedarf es hydraulischer Wirkungsnachweise eines solchen Schöpfwerkes, die die Auswirkungen im Untersuchungsgebiet feststellen. Für die Nachweise wiederum ist es wichtig, die sich im Untersuchungsgebiet befindlichen Regulierungsbauwerke zu berücksichtigen.

Um die Pumpenleistungen abhängig von den schwankenden Wasserständen in der Tideelbe im Modell zu simulieren, wurde mit Hilfe eines integrierten Echtzeitsteuerungsmodells (Real-Time-Control oder RTC) im Modellsystem Delft3D Flexible Mesh gearbeitet (Deltares 2019). Mit diesem Modul können vorgegebene Pumpenleistungen abhängig vom Binnen- und vom Tidewasserstand innerhalb des bestehenden hydrodynamischen 2D-Modells gesteuert werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Für nahezu alle Hamburger Gewässer liegen beim LSBG hydrodynamisch-numerische 2D-Gewässermodelle vor oder befinden sich im Aufbau. Das führt zu einer effizienten und reibungslosen Bearbeitung von Fragestellungen der Gewässerplanung und Maßnahmenuntersuchung. Die, überwiegend zur Umsetzung der HWRM-RL aufgebauten Modelle, dienen darüber hinaus der Überprüfung von ökologischen Durchgängigkeiten oder zum Nachweis der Hochwasserneutralität von Eingriffen im Gewässer. Dabei wächst die Vielfalt der Fragestellungen, für die diese Modelle eingesetzt werden, ständig.

So ist für die Zukunft, neben der Berechnung von Wasserständen und Abflusssdynamik, auch die Modellierung der Gewässergüte geplant, was mit dem gewählten Modellsystem möglich ist.

5 Literatur

Deltares (2019): D-flow Flexible Mesh, Manual,
http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf
(2019)

LSBG (2017): BMBF-Projekt Stuck, 2. Zwischenbericht
https://www.stuck-hh.de/fileadmin/user_upload/Stuck_2ter_Zwischenbericht_2015-2016_final.pdf

Autoren:

Prof. Dr. Gabriele Gönnert

Freie und Hansestadt Hamburg
Landesbetrieb für Straßen,
Brücken und Gewässer (LSBG)
Gewässer und Hochwasserschutz
Sachsenfeld 3-5
20097 Hamburg

Tel.: +49 40 428 26 2510

Fax: +49 351 01234 56

E-Mail: Gabriele.Goennert@LSBG.Hamburg.de

Jan-Moritz Müller

Freie und Hansestadt Hamburg
Landesbetrieb für Straßen,
Brücken und Gewässer (LSBG)
Gewässer und Hochwasserschutz
Sachsenfeld 3-5
20097 Hamburg

Tel.: +49 40 428 26 2566

Fax: +49 351 01234 56

E-Mail: Jan-Moritz.Mueller@LSBG.Hamburg.de

Anforderungen an Modelle und Modellierer bei der Aktualisierung und Neuherstellung von Hochwasserkarten

Thomas Kopp
Stephan Gerber
Norbert Prange

Die Aktualisierung von Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten ist ein komplexer Prozess mit vielen potenziellen Fehlerquellen. Die Ergebnisse bilden jedoch eine Arbeitsgrundlage wasserwirtschaftlicher Behörden und Entscheidungsträger. Zur Gewährleistung qualitativ hochwertiger Ergebnisse muss sich eine Qualitätssicherung sowohl bei Auftragnehmern als auch bei Auftraggebern über den gesamten Prozess der Kartenaktualisierung beginnend bei der Prüfung der vorhandenen Unterlagen bis hin zur tatsächlichen Herstellung der Karten erstrecken. Dabei gibt es eine Vielzahl von „Fallstricken“ zu beachten – beispielsweise beim Datenmanagement oder aber auch bei fachtechnischen Details.

Im Beitrag werden die Möglichkeiten und Grenzen der Qualitätssicherung sowie abzusehende Entwicklungen hinsichtlich zukünftiger Anforderungen aus Sicht der Autoren dargestellt.

Stichworte: Datenmanagement, Digitalisierung, Hochwasserkarten, Hochwasserrisikomanagement, Qualitätssicherung

1 Einleitung

Die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) ist für die Erstellung der Hochwasserkarten für die Fließgewässer I. Ordnung und der Bundeswasserstraße Elbe im Freistaat Sachsen zuständig. An diesen Fließgewässern wurde aktuell für rund 2000 km ein potenzielles signifikantes Hochwasserrisiko festgestellt.

Bereits nach dem Hochwasser 2002 wurden in Sachsen für die Fließgewässer I. Ordnung und die Bundeswasserstraße Elbe Hochwasserschutzkonzepte

(HWSK) aufgestellt. Diese beinhalteten auch Hochwassergefahrenkarten (HWGK) und damit wichtige Information für die Bevölkerung hinsichtlich der von Überschwemmung ausgehenden Gefahren. Gleichzeitig bilden diese sowie die zu Grunde liegenden Fachdaten vielfach die Grundlage für wasserwirtschaftliches Handeln an den Fließgewässern.

Im zweiten Zyklus der *EG-HWRM-RL (2007)* erfolgt im Freistaat Sachsen nunmehr die Aktualisierung der vorliegenden HWGK mit großen Änderungen gegenüber den HWSK. Auch im dritten Zyklus wird sukzessive die Aktualisierung der Hochwasserkarten fortgesetzt, sofern dies aus fachlichen Gründen erforderlich ist. Dabei werden nach nunmehr über 15 Jahren seit der Erstellung der HWSK im großen Umfang neue Daten an den Fließgewässern im Freistaat Sachsen erhoben.

Die Aktualisierung von Hochwassergefahren- und -risikokarten (HWRK) selbst ist ein komplexer Prozess mit vielen potenziellen Fehlerquellen. Dennoch sind qualitativ hochwertige Ergebnisse erzielbar. Dabei gibt es sowohl hinsichtlich der Projektabläufe und der Qualitätssicherung, aber auch hinsichtlich des Datenmanagements viele „Fallstricke“. Der Beitrag verfolgt das Ziel, einige dieser „Fallstricke“ aufzuzeigen und Lösungsansätze darzustellen.

2 Aktualisierung und Neuerstellung von Hochwasserkarten

Im zweiten Zyklus der *EG-HWRM-RL (2007)* müssen durch die LTV Hochwasserkarten für 580 Ortslagen geprüft und erforderlichenfalls aktualisiert werden. Der Umfang der Aufgabe zeigt, dass dafür effiziente und langfristig anwendbare Methoden erforderlich sind. Dabei darf Effizienz nicht zu Lasten der Qualität gesteigert werden. Vielmehr ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Aufwand, langfristiger Nutzbarkeit der Ergebnisse und Datengrundlagen, Qualität sowie Bearbeitungszeit anzustreben. Entstehen Fehler bei der Bearbeitung, müssen diese viele Jahre berücksichtigt werden oder können bei Nichterkennung zu Fehleinschätzung führen.

Der prinzipielle Ablauf bei der Erstellung der Hochwasserkarten für die LTV kann Abbildung 1 entnommen werden und unterscheidet sich nicht wesentlich von anderen Projekten. Für die Qualitätssicherung und zur Sicherstellung einer einheitlichen Vorgehensweise im Freistaat Sachsen ergibt sich die Notwendigkeit, Methoden und ein einheitliches Prozedere für die Kartenerstellung – teilweise sehr detailliert – vorzugeben. Dies kann dazu führen, dass Auftragnehmer von üblichen Routinen abweichen müssen. Was

in der Theorie einfach klingt, erfordert in der Praxis einen erheblichen Aufwand hinsichtlich der Kommunikation von Beginn an. Nicht nur zwischen Auftraggeber (AG) und -nehmer (AN), sondern auch innerhalb der beauftragten Ingenieurbüros und Hochschulen. Übliche Routinen müssen hinterfragt werden. Eingetübte Abläufe müssen hinsichtlich der Passfähigkeit mit dem vorgegebenen Prozedere überprüft werden.

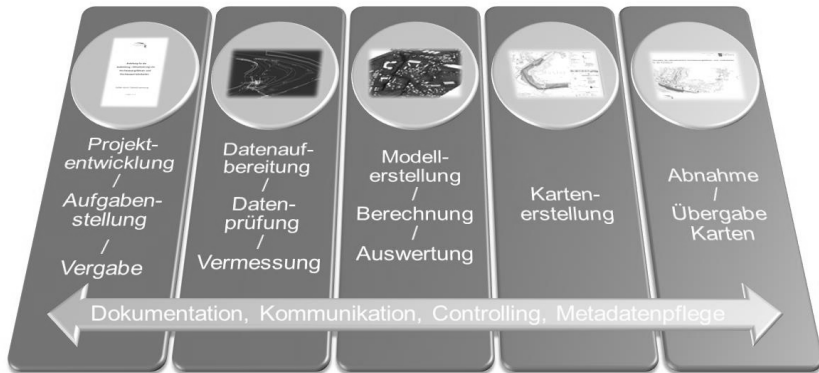


Abbildung 1: Schematischer Ablauf bei der Aktualisierung der Hochwasserkarten

Während die Projektentwicklung und die Aufgabenstellung/Leistungsbeschreibung durch den AG zunächst allein umzusetzen sind, treten bereits im Vergabeprozess regelmäßig Detailfragen auf, die durch fachkundiges Personal auf Auftraggeberseite beantwortet werden müssen. Schon hier beginnt der Prozess der Qualitätssicherung.

Die Aufbereitung und Prüfung der verfügbaren Datengrundlagen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen AG und AN, da insbesondere Fragen zur Datenverfügbarkeit und -erfordernis teilweise nur vom am Gewässer Handelnden beantwortet werden können. Voraussetzung dafür ist ein effizientes Datenmanagement bei AN und AG (vgl. Kap. 4).

Für terrestrische Vermessung an/in Fließgewässern sind klare Vorgaben, standardisierte Aufgabenstellungen und Leistungsbeschreibungen sinnvoll, die den Anforderungen an die numerische Strömungsmodellierung genügen, idealerweise auch betriebliche Aspekte (bspw. Aktualisierung von Bestandsdaten) berücksichtigen und für jedes Projekt individuell anzupassen sind. Häufig werden diese Daten die Grundlage für alle Handelnden am Gewässer in den nächsten Jahren bestimmen.

Der dritte und vierte Schritt (vgl. Abb. 1) auf dem Weg zur fertigen Hochwasserkarte kann theoretisch durch den AN weitergehend unabhängig umgesetzt werden. Genau hier ist jedoch eine Mitwirkung der am Gewässer Handelnden und des AG unerlässlich. Beispielsweise müssen bei der Kalibrierung die Berechnungsergebnisse der erstellten Modelle mit den Erfahrungen aus abgelaufenen Hochwasserereignissen, Baumaßnahmen usw. abgeglichen werden – idealerweise auch unter Einbeziehung der Gemeinden, Wasserwehren und Wasserbehörden. Erfahrungsgemäß liegt der sprichwörtliche „Teufel“ hier im Detail. Von Auftraggeberseite sollte insbesondere in diesen Phasen auf die Kommunikation auch innerhalb des beauftragten Unternehmens geachtet werden, denn je umfangreicher und komplexer Aufgabenstellungen bzw. Leistungsbeschreibungen sind, desto aufwendiger ist es, diese in allen Bearbeitungsschritten allen Bearbeitern zu vergegenwärtigen. Fehler, die in diesen Phasen nicht erkannt werden, verlängern die Bearbeitungszeit im Nachhinein erheblich.

Sind die Hochwasserkarten erstellt, geprüft und abgenommen, erfolgt die Übergabe der Karten an Gemeinden, Kommunen und Wasserbehörden sowie die Veröffentlichung und Vorstellung der Karten durch den AG mit Unterstützung des ANs. Hierfür sind Kommunikationsrichtlinien und Präsentationsvorlagen sinnvoll, um ein einheitliches Vorgehen sicherzustellen.

3 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung muss sich über den gesamten Prozess der Kartenaktualisierung von der Prüfung der vorhandenen Unterlagen, der – wenn erforderlich – terrestrischen Vermessung, der Erstellung der hydrodynamisch-numerischen Modelle, dem Datenmanagement von Modelldaten und Ergebnissen, der korrekten Datenaufbereitung mittels Geoinformationssystemen (GIS) entsprechend eines Muster-GIS-Projektes bis hin zur tatsächlichen Herstellung der Karten erstrecken. Dafür sind einheitliche Aufgabenstellungen und Prüfprozeduren unentbehrlich.

3.1 Anforderungen an numerische Strömungsmodelle

Für die Definition von Anforderungen sind verschiedene Fragestellungen wie zum Beispiel, zu welchem Zwecken die numerischen Strömungsmodelle eingesetzt werden sollen oder ob Untersuchungen von Entwicklungskonzepten für Fließgewässer im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie erforderlich werden, zu klären. In der LTV Sachsen wurden die Anforderungen, wie folgt definiert:

- ◁ Die numerischen Strömungsmodelle sollen große Gewässerabschnitte bzw. ganze Fließgewässer abbilden. Sofern Gewässerabschnitte gebildet werden, müssen diese untereinander kombinierbar sein.
- ◁ Detailmodelle für Untersuchungen von Einzelmaßnahmen werden aus einem Ausschnitt des Gesamtmodells generiert.
- ◁ Die Modelle sind für Hochwasserszenarien einzusetzen und sollen Maßnahmen aus Konzepten zur Gewässerentwicklung vereinfacht berücksichtigen können.
- ◁ Die Berechnungsnetze der fast ausschließlich zweidimensionalen (2D) hydrodynamisch-numerischen (HN) Modelle sollen so genau wie nötig und so grob wie möglich strukturiert werden.
- ◁ Die Genauigkeitsanforderungen an 2D-HN-Modelle in Ortslagen und an wichtigen Infrastrukturanlagen sind erheblich höher als außerorts bzw. in Gebieten, wo Fließgewässer einer großen Dynamik hinsichtlich der Gewässerbetten unterliegen.
- ◁ Grundsätzlich werden bei der Kalibrierung von 2D-HN-Modellen bis zu 10 cm Differenz gegenüber Hochwassermarkierungen und bis zu 20 cm in hydraulisch ungünstigen Bereichen oder großer Turbulenz akzeptiert. Größere Abweichungen sind zu prüfen und zu begründen.
- ◁ Die Rechenkerne bzw. Modellsysteme sollen nicht infolge neuer Versionen zu erhebliche Veränderungen der Berechnungsergebnisse führen. Anderenfalls ergäbe sich das Erfordernis, seitens des AG eine Vielzahl von Versionen vorzuhalten bzw. die Modelle laufend an neue Versionen anzupassen.

3.2 Anforderungen an die Modellierer

Die Fortschreibung von Hochwasserkarten erfordert fachlich breit aufgestellte Ingenieurbüros und die Bereitschaft eingeübte Routinen an die teilweise detaillierten Vorgaben der Aufgabenstellungen anzupassen. Diese umfassen Festlegungen zur Modellerstellung, zum Berichtswesen, zu Metadaten, zu GIS-Projekten, zu Plänen, zu „Modell-Logbüchern“ und zur Datenhaltung. Daraus können u. a. folgende Anforderungen an die Modellierer abgeleitet werden:

- ◁ Bei der erstmaligen Erstellung der Hochwasserkarten ist meist eine Intensivierung der internen und externen Kommunikation notwendig. Dies betrifft nicht nur die Schnittstelle zwischen Modellierung und GIS-Bearbeitung, sondern auch mit dem AG und mit weiteren am Projekt Beteiligten. Auf allen Seiten müssen daher Möglichkeiten der direkten und kurzfristigen Kommunikation geschaffen werden.

- ◀ Im Rahmen der Modellierung ist es wichtig, von Anfang an eine klare Struktur und eine lückenlose Dokumentation der Daten zu gewährleisten. Nur so ist zweifelsfrei bestimmbar, mit welchen Daten das Modell aufgebaut bzw. fortgeschrieben wurde. Nachträglich muss es beispielsweise möglich sein, Datengrundlagen hinsichtlich möglicher Fehlerquellen zu prüfen. Das erfordert von Modellierern und allen übrigen Projektarbeitern eine gemeinsame Datenstruktur und ein hohes Maß an Disziplin hinsichtlich der Datenhaltung.
- ◀ Folgende fachliche Vorgaben der LTV Sachsen unterschieden sich in mehreren Fällen offensichtlich von bisher angewendeten Routinen, wurden nicht konsequent umgesetzt und führten daher im Nachgang zu erheblichen Überarbeitungsaufwand:
 - Für alle Modelle, die im Rahmen des HWRM für die LTV Sachsen erstellt werden, ist ein sogenanntes hydraulisches digitales Geländemodell (hDGM) aufzubauen. Dieses umfasst neben dem DGM des Staatsbetriebs Geoinformation Sachsen (GeoSN) im wesentlichen terrestrische Vermessungen des aquatischen Bereichs und maßgebende Bruchkanten auf den Vorländern. Das hDGM bildet die Grundlage für die Interpolation der Höhendaten auf das Berechnungsnetz und den Verschnitt mit den Berechnungsergebnissen.
 - Für die Gebäudegrundrisse liegen unterschiedliche Flächendatensätze vor, die besonders in für die Strömung relevanten Bereichen mit den Vor-Ort-Begehungen abzugleichen sind.
 - Ungesteuerte Wehre sind grundsätzlich im Berechnungsnetz dreidimensional zu modellieren. Gesteuerte Wehre können in Abstimmung mit dem AG mittels eindimensionalen inneren Randbedingungen modelliert werden.

3.3 Anforderungen an die Auftraggeber

Bei der Aktualisierung/Neuerstellung von Hochwasserkarten ist eine enge fachliche Begleitung der AN durch den AG erforderlich. Nachfolgend sind weitere wesentliche Anforderungen aufgeführt.

- ◀ Aufgrund der teilweise sehr großen Modellabschnitte, der langen Zeitdauer der Bearbeitung und der in der Vergangenheit bereits umgesetzten und während der Kartenaktualisierung in der Umsetzung befindlichen Maßnahmen an Fließgewässern ist ein steter Überblick über die Herkunft, den Stand und die Aktualität der Daten erforderlich. Das bedarf einer entsprechend qualitätsgesicherten Datenablage und Datenpflege/-laufendhaltung mit entsprechenden Systemen.

- ◀ Der AG ist gleichzeitig Ansprechpartner für Modellierer, Vermesser, andere Behörden, eigene Kollegen und die Öffentlichkeit. Dies erfordert neben dem erforderlichen Verwaltungswissen entsprechende Fachexpertise im Bereich der Modellierung, Vermessung, CAD/GIS-Systemen und kommunikative Fähigkeiten bezüglich der diversen Adressaten/Zielgruppen.
- ◀ Einheitliche Qualitätskriterien des AG gewährleisten eine vergleichbare Qualität der Ergebnisse trotz Prüfung durch unterschiedliche Bearbeiter.
- ◀ Um eine verständliche, einheitliche interne und externe Kommunikation sicherzustellen, sind einheitliche Grundsätze und ein regelmäßiger interner Austausch der beim AG beteiligten Bearbeiter erforderlich.
- ◀ Neben der Eigenverantwortung des ANs unterstützt die frühzeitige Information über der Modellierer und Vermesser erforderliche Daten und Arbeitsschritte durch den AG einen effektiven Projektablauf.

3.4 Instrumente der Qualitätssicherung

Als ein Instrument der Qualitätssicherung der LTV Sachsen wurden im Vorfeld umfangreiche Musteraufgabenstellungen für die Modellierung, Kartenerstellung und die Vermessung entwickelt, welche projektkonkret angepasst werden. Parallel dazu wurden seitens der LTV Sachsen umfangreiche Muster-Berichte, -GIS-Projekte und -CAD-Projekte erstellt, welche Qualitätsvorgaben enthalten.

Es ist jedoch nahezu unmöglich im Vorfeld der Bearbeitung alle „Fallstricke“ zu erkennen und in den Aufgabenstellungen/Mustern zu berücksichtigen. Daher ist eine Fortschreibung der Muster in bestimmten Turnussen einzuplanen.

Von den AN sind dem AG geprüfte und belastbare Ergebnisse zu übergeben. Dafür sind neben der Plausibilitätsprüfung durch die Bearbeiter selbst interne Prüfroutinen zu entwickeln und anzuwenden.

Durch den AG sind die Ergebnisse ebenfalls zu prüfen. Die einheitliche Prüfung von Modellen und Karten erfordert einheitliche Prüfschwerpunkte und Qualitätskriterien. Die LTV Sachsen hat für die Prüfung der Modelle einen Muster-Prüfbericht entwickelt, nach dem eine weitestgehend einheitliche Prüfung diverserer Qualitätsmerkmale erfolgt. Für die formal korrekte GIS-Ablage der Ergebnisse hat die LTV ein Prüf-Tool entwickeln lassen, mit dessen Unterstützung die GIS-Datenstruktur, Attributierung und Datenablage automatisiert geprüft werden kann. Die fachliche Prüfung muss hingegen durch mit den Örtlichkeiten vertraute Bearbeiter erfolgen. Auch für diese Prüfrouti-

nen und Tools ist eine laufende Aktualisierung aufgrund neuer Erkenntnisse und/oder sich verändernder Randbedingungen erforderlich.

Für die Durchführung der Prüfungen ist auf Seiten des AG fachkundiges Personal notwendig.

3.5 Datenmanagement

Im Zuge der Aktualisierung beziehungsweise Neuerstellung von Hochwasserkarten werden komplexe Daten erzeugt, die:

- ◁ thematisch vielfältig (z.B. Hydrologie, Vermessung oder Modelldaten) und gleichzeitig voneinander abhängig, aber nicht direkt verknüpft sind,
- ◁ jeweils in sich sehr komplex sind (so enthält beispielsweise das Shapefile eines Bauwerksdatensatzes 17 verschiedene Eigenschaftsattribute),
- ◁ in verschiedenen Formaten vorliegen (Gutachten, Vermessungsdaten, GIS Daten, Ergebnisse als PDF, usw.) und
- ◁ unterschiedlichen Raumbezug haben (hydrologische Gutachten können sich auf das gesamte Einzugsgebiet beziehen, Vermessungsdaten nur auf Bruchkanten oder ausgewählte Bauwerke, die fertigen Karten enthalten dann alle Informationen).

Diese Rahmenbedingungen erfordern eine klar strukturierte Datenhaltung, die nicht nur eine einfache Übersicht über die erzeugten Daten ermöglicht, sondern möglichst auch Querbeziehungen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Daten abbilden kann. Die wesentlichen Anforderungen an ein Datenmanagement lassen sich daher wie folgt definieren:

- ◁ alle Daten sollen einheitlich strukturiert abgelegt werden,
- ◁ Metadaten sollen Informationen zu Inhalt, Autor, Raumbezug, Aktualität usw. enthalten,
- ◁ es sollten inhaltliche Änderungen, die Einfluss auf eine Aktualisierung der Produkte haben können, erkennbar sein und fachliche Entscheidungen über ggf. erforderliche Kartenaktualisierungen erleichtern und
- ◁ diese Änderungen sollten auch zeitlich nachverfolgbar sein, so dass Aussagen möglich werden, zu welchem Zeitpunkt welche Daten gültig waren und welche Datenstände in das Produkt Hochwasserkarten eingeflossen sind.

Eine Datenhaltung, die diesen Anforderungen entspricht, wird bisher in der Landestalsperrenverwaltung hinsichtlich der ersten beiden Anforderungen umgesetzt. So wurde eine einheitliche Datenstruktur definiert, die von internen Ablagestrukturen über einheitliche Dateibezeichnungen bis hin zu vorgegebenen Definitionen aller Felder und Attribute der GIS-Daten reicht. Zu-

sätzlich dazu werden für die GIS Datensätze Metadaten erzeugt und für die hydraulischen Modelle ein Modellogbuch erstellt und kontinuierlich laufend gehalten. Damit wird eine einheitliche Datenablage und ausreichende Datenbeschreibung gewährleistet. Auf diese Weise wird allerdings noch keine inhaltliche Verknüpfung und zeitliche Historisierung der Daten erreicht. Aktuell erfolgt dies ausschließlich auf der Basis von Expertenwissen des eingesetzten Fachpersonals.

In der aktuellen Hochphase der Kartenaktualisierung und aller damit einhergehenden Teilprozesse ist die Diskussion über die weitere Entwicklung des Datenmanagements in der Landestalsperrenverwaltung noch nicht abgeschlossen. Allerdings zeigen die Erfahrungen, dass alle Vorgaben zu einheitlichen Datenstrukturen und standardisierten Inhalten den Aufwand sowohl bei den bearbeitenden Ingenieurbüros als auch beim AG erhöhen. Das betrifft sowohl die korrekte Erzeugung der Daten, den Umgang mit allgegenwärtigen Sonderfällen als auch die inhaltliche und formale Prüfung der erzeugten Daten und umfasst auch den dafür erforderlichen zusätzlichen Kommunikationsaufwand.

Insofern ist bei weiteren Überlegungen zum Datenmanagement stets auch zu hinterfragen, in wie weit die angestrebten Verbesserungen zu weiterem zusätzlichen Aufwand führen, der nicht zwingend für das erarbeitete Produkt erforderlich ist. Zumindest mittel- bis langfristig muss durch neue technische Lösungen zum Datenmanagement der Gesamtaufwand für die Laufendhaltung der Hochwasserkarten sinken.

Die Landestalsperrenverwaltung ist offen für eine Diskussion zu Möglichkeiten des Datenmanagements für das Hochwasserrisikomanagement, im Idealfall gemeinsam mit den Ingenieurbüros, die an der Aktualisierung bzw. Erstellung der Hochwasserkarten arbeiten.

4 Resümee

Die Prüfung und bei Erfordernis Aktualisierung der Hochwasserkarten ist nach *EG-HWRM-RL (2007)* eine kontinuierlich umzusetzende Aufgabe, über die im Sechsjahreszyklus gegenüber der EU berichtet werden muss. Für diese Daueraufgabe erleichtert eine lückenlose Dokumentation der verwendeten Datengrundlagen, Modelle und Ergebnisdaten die Fortschreibung erheblich. Für die Sicherstellung der angestrebten Qualitätsstandards gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Bei der LTV Sachsen wurden Grundlagen für eine effiziente Fortschreibung der Hochwasserkarten und für die Qualitätssicherung bei der Kartenerstellung geschaffen. Diese müssen in kommenden Jahren kontinuierlich fortgeschrieben und weiterentwickelt werden.

5 Literatur

EG-HWRM-RL (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.

Autoren:

Thomas Kopp
Dr. Stephan Gerber
Norbert Prange

Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
Fachbereich Wasserwirtschaft
Referat EU-Richtlinien/Naturschutz
Bahnhofstraße 14
01796 Pirna

Tel.: +49 3501 796-444
Fax: +49 3501 796-113
E-Mail: thomas.kopp@ltv.sachsen.de
stephan.gerber@ltv.sachsen.de
norbert.prange@ltv.sachsen.de

Robuste Parameterschätzung und eine effiziente Unsicherheitsanalyse in großskaligen hydrologischen Modellanwendungen

Marlene Gelleszun
Phillip Kreye
Günter Meon

Die Parameterschätzung in großskaligen hydrologischen Modellen geht insbesondere bei Anwendung moderner, rechenintensiver Optimierungsalgorithmen mit großen Herausforderungen einher. Um dieser Discrepanz zu begegnen, wurde eine lexikografische Kalibrierungsstrategie entwickelt, bei der im Gegensatz zu der klassischen multikriteriellen Optimierung die Anforderungen an die Zielgrößen bereits im Vorfeld der Kalibrierung formuliert werden. Für ein Untersuchungsgebiet konnten mit Hilfe der entwickelten Optimierungsstrategie sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Neben einem ausgewogenen Wasserhaushalt wurde auch die Saisonalität sowohl in der Kalibrierung, als auch in der Validierung realitätsnah abgebildet. Für eine Überprüfung der Methode wurden für drei unterschiedliche Einzugsgebiete synthetische Ganglinien erzeugt, an denen das Verfahren getestet wurde. Alle fünf Parametersets wurden mit weniger als 10% der Rechenzeit, die von einem globalen multikriteriellen Optimierungsalgorithmus benötigt wurde, ermittelt.

Mit Hilfe der zeiteffizienten FOSM-Methode (First Order Second Moment), welche auf dem allgemeinen Varianz-Kovarianzfortpflanzungsgesetz basiert, wurden die Unsicherheiten der Parameter und die Konfidenzintervalle der Abflusssimulationen ermittelt.

Stichworte: Parameterschätzung in hydrologischen Modellen, Unsicherheitsanalyse, FOSM-Methode, lexikografische Kalibrierungsstrategie

1 Einleitung

Für zahlreiche Aufgaben in der hydrologischen Praxis werden Wasserhaushaltskomponenten über lange Zeiträume untersucht. Im Gegensatz zur Analyse von Einzelereignissen können für Extremwertstatistiken oder Klimafolgenforschungen auf der Meso- bis Makroskala nur dann verlässliche Aussagen getroffen werden, wenn das verwendete hydrologische Modell in der

Lage ist, den gesamten Zeitraum plausibel abzubilden. Für die Parameterschätzung derartiger Modelle haben sich bei wissenschaftlichen Fragestellungen in den letzten Jahren zunehmend komplexe semi- bis vollautomatische, meist multikriterielle Optimierungsmethoden etabliert (Efstratiadis und Koutsoyiannis 2010). In der planerischen und operationellen Ingenieurspraxis ist eine Umsetzung dieser Methoden oft nicht möglich, was in erster Linie durch die Diskrepanz zwischen der hohen Modellauflösung, der Modellkomplexität und den rechenaufwändigen Optimierungsmethoden begründet ist. Es wurde eine auf Präferenzordnungen basierende lexikografische Kalibrierungsstrategie entwickelt, die zeiteffizient ist und robuste Parameter liefert.

2 Material und Methoden

2.1 Das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI

Das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI wurde im Zuge einer Kooperation der TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz) und dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH, Braunschweig, entwickelt (LWI-HYWAG und IfW 2012). Es handelt sich um ein deterministisches hydrologisches, vektorbasiertes Modellsystem mit einer GIS-Schnittstelle. Es wird für wissenschaftliche Fragestellungen (Hölscher et al. 2012) und für die operationelle Hochwasservorhersage in Niedersachsen sowie in zahlreichen nationalen und internationalen Projekten erfolgreich eingesetzt (Meon et al. 2014). Die räumliche Differenzierung erfolgt in vier Ebenen: Hydrotöpfe, Teilflächen, Teileinzugsgebiete und Gesamteinzugsgebiet. Der modulare Aufbau ermöglicht eine an die Fragestellung angepasste Auswahl der Berechnungsansätze mit verschiedenen Verfahren zur Beschreibung der hydrologischen Prozesse (vgl. LWI-HYWAG und IfW 2012).

In der vorliegenden Studie wurden die sechs nachfolgend aufgelisteten Kalibrierungsparameter verwendet. Sie gelten für Teileinzugsgebiete und wirken flächendifferenziert auf Hydrotopbasis. Die Parameter k_i , k_u und k_b sind der Abflusskonzentration zuzuordnen und wirken auf Teilflächenbasis.

- $initial$: Startfülle des Bodenspeichers. Ein Wert von Null steht für mittlere Verhältnisse (Feldkapazität).
- N_{Dis} : Parameter zur Beeinflussung der Disaggregation des Tagesniederschlags auf Stundenwerte. Ein Wert kleiner als der Standard-

wert erhöht, ein größerer Wert verringert die Niederschlagsintensitäten.

- FET: Konstante zur Beeinflussung der Reduktion der potentiellen ET. Ein kleinerer Wert als der Standardwert bewirkt eine erhöhte aktuelle ET und damit ein kleineres Abflussvolumen.
- K_i , K_u und K_b : Speicherkonstanten für den Zwischenabfluss, Grundwasserabfluss und langsamen Grundwasserabfluss. Größere Werte als die Standardwerte verzögern den Gebietsabfluss stärker.

2.2 Untersuchungsgebiete

Zur Validierung der Methode wurden drei Modellgebiete in Norddeutschland betrachtet. Die räumliche Einordnung der Gebiete sowie deren wesentliche Eigenschaften können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 1: Gebietseigenschaften der drei Modellgebiete Neuenburg, Göttingen und Hellwege.

	Neuenburg	Göttingen	Hellwege
Pegelkoordinaten (Rechts/Hoch) [m]	3430540/ 5918870	3563668/ 5713486	3513861/ 5882633
Gewässer	Zeteler Tief	Leine	Wümme
Größe [km²]	28	628	907
Dominante Landnutzung	45% Acker, 35% Wiesen und Weiden, 10% Wald, 10% Sonst.	58% Acker, 28% Wald, 8% Wiesen und Weiden, 5% Stadt, 1% Sonst.	37% Acker, 32% Wiesen und Weiden, 21% Wald, 10% Sonst.
Bodeninformationen	57% kultivierte Moorböden, 37% Rein- und Lehmsande, 6% Sonst.	60% Lehmschluffe, 35% Lehmsande, 5% Sonst.	80% Rein- und Lehmsande, 20% kultivierte Moorböden
Höhe ü. NN [m]	3,5-14,5	145-467	12-121
MQ (1960-90) [m³s⁻¹]	0,25*	5,62	9,91
\bar{N} (1960-90) [mm]	818 (Station Varel)	645 (Station Göttingen)	796 (Station Rotenburg)

\bar{T} (1960-90) [°C]	8,7 (Station Friesoythe-Altenoythe)	8,7 (Station Göttingen)	8,7 (Station Rotenburg)
Anzahl Hydrotöpfe	175	1531	1778

*Mittel über 1980-2010

2.3 Parameterschätzung

Optimierungsaufgaben können sich auf eine einzelne Zielfunktion beziehen (in der Hydrologie meist der Gebietsabfluss) oder mehrere Zielkriterien berücksichtigen, was als multikriterielle Optimierung bezeichnet wird. Bei der multikriteriellen Optimierung ist das Ergebnis eine Vielzahl von pareto-optimalen Parametersets, welche im Postprocessing evaluiert werden müssen (Madsen und Khu 2006). Bei beiden Optimierungsansätzen wird zwischen lokalen und globalen Optimierungsverfahren unterschieden, wobei globale Verfahren immer einen höheren Rechenaufwand bedeuten aber im Gegenzug eine von den Startwerten unabhängige Parameterschätzung liefern (vgl. z.B. Efstratiadis und Koutsoyiannis 2010). Aufgrund der Rechenintensität besteht ein grundsätzlicher Konflikt zwischen hochaufgelösten hydrologischen Modellen in Verbindung mit komplexen Optimierungsalgorithmen (Zhang et al. 2009). Es wurde daher eine lexikografische Kalibrierungsstrategie entwickelt, bei der die Präferenzordnung der zu erreichenden Ziele bereits im Vorfeld der Optimierung durch spezifische Zielfunktionen festgelegt wurde (vgl. Gelleszun et al. 2017). Die größte Herausforderung der lexikografischen Kalibrierung besteht in der sinnvollen Unterteilung der Parameter in kleinere Parameteruntergruppen, für die geeignete Zielfunktionen entwickelt werden müssen. Durch diese Zuordnung wird das Expertenwissen bereits in die Kalibrierung einbezogen. Das sukzessive Abarbeiten der Zielfunktionen verkleinert den Suchraum und ermöglicht den Einsatz lokaler, effizienter Optimierungsverfahren.

Es wurde die ableitungsfreie Downhill-Simplex-Methode nach Nelder und Mead (1965) verwendet. Ein Simplex ist ein geometrisches Konstrukt aus einer Menge von $n+1$ Punkten im n -dimensionalen Parameterraum. Je kleiner die Dimension des Parameterraums ist, desto zuverlässiger konvergiert das Verfahren.

In Anlehnung an die Anforderungen der Aufgabenstellung wurde die nachfolgende Präferenzordnung mit der übergeordneten Zielgröße „beobachteter Gebietsabfluss“ festgelegt:

1. Gesamtvolumen (Parameter θ_{initial} , Zielfunktion: Summe der quadratischen Abweichung aus den kumulierten Zeitreihen des beobachteten und simulierten Abflusses für die ersten fünf Monate des Simulationszeitraums. Parameter FET: Betrag des Volumenfehlers)
2. Wellenform und Scheitel der Abflussganglinien (Parameter k_i , k_u : Modelleffizienz nach Nash und Sutcliffe (1970))
3. Saisonalität (Parameter k_b : RMSE der logarithmierten Zeitreihen multipliziert mit dem RMSE der Abflüsse (beobachtet, simuliert), die jeweils unterhalb des 35% Perzentils der Unterschreitungsdauerlinie liegen. k_u , k_b , N_{Dis} : Modelleffizienz nach Nash und Sutcliffe (1970) berechnet aus den logarithmierten Zeitreihen)

2.4 Unsicherheitsanalyse

Eine Unsicherheitsanalyse kann verschiedene Aspekte innerhalb der Modellkette berücksichtigen. Viele Ansätze beruhen auf stochastischen Verfahren, wie beispielsweise Monte Carlo-Simulationen (Ajami et al. 2007). Weil diese Zufallsexperimente im Kontext der hydrologischen Modellierung sehr zeitaufwändig sind, wurde in dieser Studie auf approximative Verfahren zurückgegriffen. Mithilfe der FOSM-Methode (First Order Second Moment) wurden die Parameterunsicherheiten und die Konfidenzintervalle der Simulationen quantifiziert. Die FOSM-Methode basiert auf dem allgemeinen Varianz-Kovarianzfortpflanzungsgesetz (z.B. Witte und Schmidt 2004, Seite 149):

$$C_{yy} = AC_{xx}A^T$$

Die Kovarianzmatrix C_{xx} enthält die Varianzen und Kovarianzen der Modellparameter, die a-priori abzuschätzen sind. Für die vorliegende Studie wurde C_{xx} näherungsweise empirisch entsprechend nachfolgender Gleichung berechnet:

$$C_{xx} = s_F^2(A^T A)^{-1}$$

Die Matrix A wird als Jacobi-, Sensitivitäts- oder Funktionalmatrix bezeichnet, sie enthält die partiellen Ableitungen des Modells nach den Parametern. Im Allgemeinen kann ein hydrologisches Modell nicht analytisch nach den Parametern abgeleitet werden. Folglich wird für die Berechnung der Jacobi-Matrix A auf eine numerische Ableitung (zentrale Differenzen) im Parameteroptimum zurückgegriffen (vgl. Maskey und Guinot 2003). Die Kovarianzmatrix C_{yy} ($m \times m$) der berechneten Zufallsgröße y (im vorliegenden Fall der simulierte Abfluss) enthält auf der Diagonalen die Varianzen von y , die auch direkt nach Gleichung 2 berechnet werden können:

$$\text{var}(\hat{y}) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ij} a_{ik} c_{jk}$$

a_{ij} : Elemente von A
 c_{ij} : Elemente von C_{xx}

Im letzten Schritt der Optimierung wurde die Modelleffizienz der logarithmierten Abflüsse maximiert. Demzufolge wurden die Unsicherheiten auf Basis der logarithmierten Abflussdaten quantifiziert. Im Anschluss erfolgte als Umkehroperation die Potenzierung der berechneten Konfidenz- und Vorhersageintervalle.

3 Ergebnisse

3.1 Überprüfung der lexikografischen Kalibrierungsstrategie auf Grundlage synthetischer Abflussganglinien

Es wurden fünf unterschiedliche Parametersets (bestehend aus je sechs Parametern) generiert, auf deren Basis für jedes der drei Untersuchungsgebiete Abflussganglinien über 20 Jahre erzeugt wurden. Die erhaltenen simulierten Abflüsse dienten anschließend als „synthetische Beobachtung“, um den originalen Parametersatz mit dem entwickelten Verfahren zu identifizieren.

Die Startwerte sowie die oberen und unteren Grenzwerte wurden für alle fünf Parametersets gleich gewählt. Nach durchschnittlich 131 Iterationen wurden alle Parametersets mit Hilfe der lexikografischen Kalibrierungsstrategie ausreichend genau ermittelt. Als Vergleich wurde für das kleinste Untersuchungsgebiet Neuenburg ein globaler Optimierungsalgorithmus (SCE-UA nach Duan et al. (1992) mit Standardeinstellungen) angewendet. Alle Parameter wurden simultan nach ca. 1900 Iterationen identifiziert. Hier zeigt sich ein deutlicher Geschwindigkeitsvorteil der entwickelten lexikografischen Kalibrierungsstrategie.

3.2 Überprüfung der Robustheit der Parameterschätzung

Neben der Effizienz einer Parameterschätzung stand auch die Plausibilität der optimierten Parameter im Fokus. Als Merkmal für die Plausibilität wurden die Ähnlichkeiten von Parametersätzen für das gleiche Untersuchungsgebiet für unterschiedliche Zeiträume untersucht.

Dafür wurde die historische Abflussganglinie in fünf äquidistante Zeitintervalle von je zwei Jahren unterteilt, für die dann jeweils die Parameterschätzung erfolgte. Die optimierten Parametersätze der einzelnen Zeitintervalle wurden

anschließend auf die jeweils andern Zeitintervalle sowie den gesamten Zeitraum angewendet. Anschließend wurden Gütemaße zur Quantifizierung der Ähnlichkeiten berechnet (z.B. Nash-Sutcliffe-Koeffizient der logarithmierten Zeitreihen). Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass das globale Optimierungsverfahren in der Kalibrierungsphase bessere Gütemaße erzielt, als das lexikografische Verfahren. Hervorzuheben ist jedoch, dass die Gütekriterien für die Validierungszeiträume nach der lexikografischen Kalibrierung im Mittel höher sind und eine kleinere Spannweite aufweisen, was die Robustheit der Methode aufzeigt.

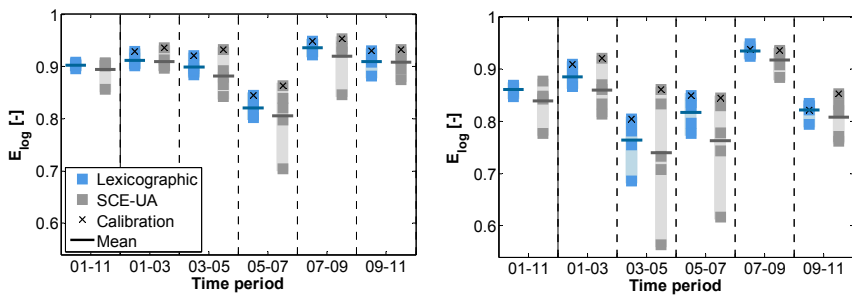


Abbildung 1: Links: Reckershausen, Rechts: Hellwege. Kreuzvalidierung der Kalibrierungsergebnisse. In blau sind die Ergebnisse der lexikografischen Kalibrierungsstrategie dargestellt, in grau die des globalen SCE-UA-Algorithmus.

Neben den Ähnlichkeiten der Gütekriterien wurden auch die Ähnlichkeiten der Parametersets der fünf Zeiträume untersucht. Die Parameter nach der lexikografischen Kalibrierungsstrategie wiesen deutlich höhere Ähnlichkeiten zueinander auf, als die Parameter der globalen Optimierung, was für eine hohe gebietsbezogene Repräsentativität der ermittelten Parameter spricht.

3.3 Anwendung der lexikografischen Kalibrierungsstrategie am Pegel Neuenburg

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Gang- und Summenlinien des beobachteten und simulierten Abflusses auf Grundlage der optimierten Parameter am Pegel Neuenburg. Die Präferenzvorgabe „Volumenfehler“ wurde eingehalten (hohe Ähnlichkeiten der Summenlinien). Wellenform und Abflussscheitel als zweite Präferenzvorgabe werden ebenfalls erfüllt, was sich durch einen Nash-Sutcliffe Koeffizienten von 0,78 in der Kalibrierung und 0,80 in der Validierung bemerkbar macht.

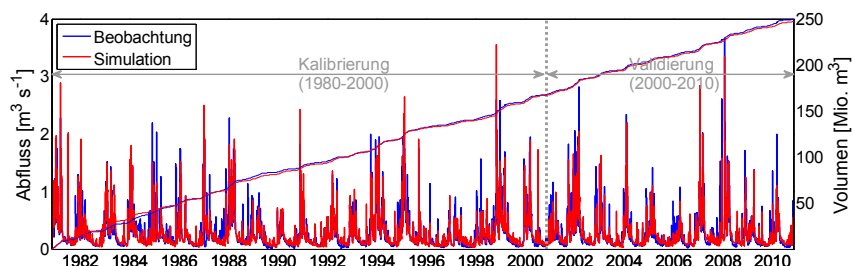


Abbildung 2: Gang- und Summenlinien der beobachteten und simulierten Zeitreihen für die Kalibrierung und Validierung am Pegel Neuburg an dem Zeteler Tief.

Für die Bewertung der dritten Präferenz „Saisonalität“ wurden Dauerlinien und langjährige Tagesmittelwerte herangezogen. Es zeigten sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen den beobachteten und simulierten Abflüssen. Die FOSM-Methode lieferte plausible Konfidenzintervalle der Abflussganglinien (vgl. nachfolgende Abbildung) und kann bei rechenintensiven Modellanwendungen als Alternative zu zufallsbasierten Methoden in Betracht gezogen werden.

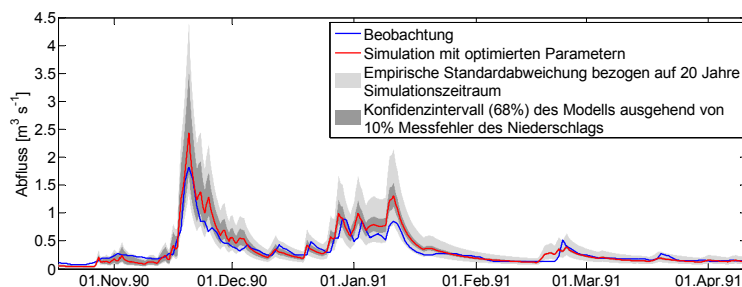


Abbildung 3: Detailausschnitt (Kalibrierungsperiode) der beobachteten und simulierten Zeitreihen des Abflusses sowie die empirische Standardabweichung und die Unsicherheiten des Modells, ausgehend von einem zehnpromzentigen Niederschlagsfehler am Pegel Neuburg an dem Zeteler Tief.

4 Diskussion und Ausblick

Anwendungen von hochentwickelten hydrologischen Modellen mit komplexen Optimierungsverfahren sind in der operationellen Hydrologie wegen des enormen Rechenaufwands sehr problematisch (Zhang et al. 2009). Durch diese Diskrepanz motiviert wurde eine auf Präferenzordnungen beruhende,

lexikografische Kalibrierungsstrategie vorgestellt. Anhand zweier methodischer Ansätze wurde das Verfahren überprüft. Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Verfahren repräsentative und robuste Parametersätze für drei unterschiedliche Einzugsgebiete mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand lieferte.

Das durch den lexikografischen Ansatz ermittelte Parameterset für den Pegel Neuenburg ist aus hydrologischer Sicht plausibel. Der beobachtete Abfluss konnte für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für alle Anforderungspunkte sehr gut wiedergegeben werden. Die a priori festgelegte Präferenzordnung von Gesamtvolumen, Wellenform und Saisonalität konnte erfüllt werden. Unter der Prämisse des geringen Rechenbedarfs wurden Unsicherheiten der Parameter, des Modells und der Modellvorhersage approximativ bestimmt.

Durch die Aufteilung der Parameter in Untergruppen und das sukzessive Vorgehen wird der Parameter-Suchraum insgesamt verkleinert. Im Vergleich zur klassischen multikriteriellen Optimierung werden weniger als 10% der Iterationen benötigt.

5 Literatur

- Ajami, N. K., Q. Duan & S. Sorooshian (2007): An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. - *Water Resources Research* 43 (1).
- Duan, Q., S. Sorooshian & V. Gupta (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. - *Water Resources Research* 28 (4), 1015–1031.
- Efstratiadis, A. & D. Koutsoyiannis (2010): One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review. - *Hydrological Sciences Journal* 55 (1), 58–78.
- Gelleszun, M., P. Kreye & G. Meon (2017): Representative parameter estimation for hydrological models using a lexicographic calibration strategy. *Journal of Hydrology*, 553, 722–734.
- Hölscher, J., U. Petry, M. Bertram, M. Anhalt, S. Schmidke, U. Haberlandt et al. (2012): Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. 1. Aufl. Norden: NLWKN (Oberirdische Gewässer, 33).
- LWI-HYWAG und IfW (2012): Panta Rhei Benutzerhandbuch - Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware (unveröffentlicht). Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz am Leichtweiß-Institut für Wasserbau

- der TU Braunschweig in Kooperation mit dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH, Braunschweig.
- Madsen, H. & S. Khu (2006): On the use of Pareto optimization for multi-criteria calibration of hydrological models. - IAHS PUBLICATION 304, 93.
- Maskey, S. & V. Guinot (2003): Improved first-order second moment method for uncertainty estimation in flood forecasting. - Hydrological Sciences Journal 48 (2), 183–196.
- Meon, G., M. Päscht & N. V. Phuoc (2014): EWATEC-COAST: Technologies for Environmental and Water Protection of Coastal Regions in Vietnam. Contributions to 4th International Conference for Environment and Natural Resources -- ICENR 2014. 1., Aufl. Göttingen, Niedersachs: Cuvillier, E (HYWAG Schriftenreihe, 1).
- Nash, J. E. & J. V. Sutcliffe (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles.
- Nelder, J. A. & R. Mead (1965): A simplex method for function minimization. - The computer journal 7 (4), 308–313.
- Witte, B. & H. Schmidt (2004): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 5., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: Wichmann.
- Zhang, X., R. Srinivasan, K. Zhao & M. van Liew (2009): Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. - Hydrological Processes 23 (3), 430–441.

M.Sc. Marlene Gelleszun
Prof. Dr.-Ing. Günter Meon

Dr.-Ing. Phillip Kreye

Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft
und Gewässerschutz; Leichtweiß-Institut
für Wasserbau
Technische Universität Braunschweig Beethovenstraße 51a
38106 Braunschweig

(vormals TU Braunschweig)
BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Abteilung Sicherheitsuntersuchungen
Eschenstraße 55
31224 Peine

Tel.: +49 531 3913953
Fax: +49 531 3913955
E-Mail: m.gelleszun@tu-bs.de
g.meon@tu-bs.de

Tel.: +49 5171 4317
E-Mail: Phillip.Kreye@bge.de

Hochwasserrückhaltung Öberauer Schleife

Anke Ezzeddine, Mohamad Sadaghiani, David Biebach,
Rudolf Schneider

Die Hochwasserrückhaltung (HWR) „Öberauer Schleife“ ist einer der priorisierten Flutpolderstandorte im Rahmen des Bayerischen Flutpolderprogramms (LfU 2014). Hierbei handelt es sich um eine geplante Flutpolderkette entlang der bayerischen Donau, deren überörtliche Wirkung im Ergebnis der vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) beauftragten Studien „Verzögerung und Abschätzung von Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau“ (TU München, 2012) und „Vertiefte Wirkungsanalyse (TU München, 2017) nachgewiesen wurde. Mit der HWR sollen am Standort der Öberauer Schleife bei Straubing extreme Spitzenabflüsse in der Donau möglichst wirksam gekappt werden.

Der Vortrag hat zum Ziel die Komplexität des Standorts und der Lösung der Aufgabe am Beispiel der Optimierung des Einlaufbauwerks mittels 2d-Modell zu erläutern. Gleichzeitig wird dargestellt, welche Herausforderungen dabei die Nutzung der digitalen Technik mit sich brachte.

Stichworte: Hochwasserrückhaltung Öberauer Schleife, HWR, Einlaufbauwerk, 2D-Modell, Optimierung

1 Übersicht über das geplante Vorhaben

1.1 Vorhabengebiet

Das Vorhabengebiet, s. nachfolgende Abbildung, befindet sich im Freistaat Bayern im Regierungsbezirk Niederbayern unmittelbar nordwestlich angrenzend an die Stadt Straubing und umfasst eine Fläche von insgesamt rd. 500 ha.

Das Vorhabengebiet ist geprägt durch die Donau als Bundeswasserstraße mit der Staustufe Straubing, dem unterstrom der Staustufe zufließenden Kößnach-Ableiter sowie der Öberauer Donauschleife, einem ehemaligen Altarm der Donau, die der geplanten HWR ihren Namen gibt.

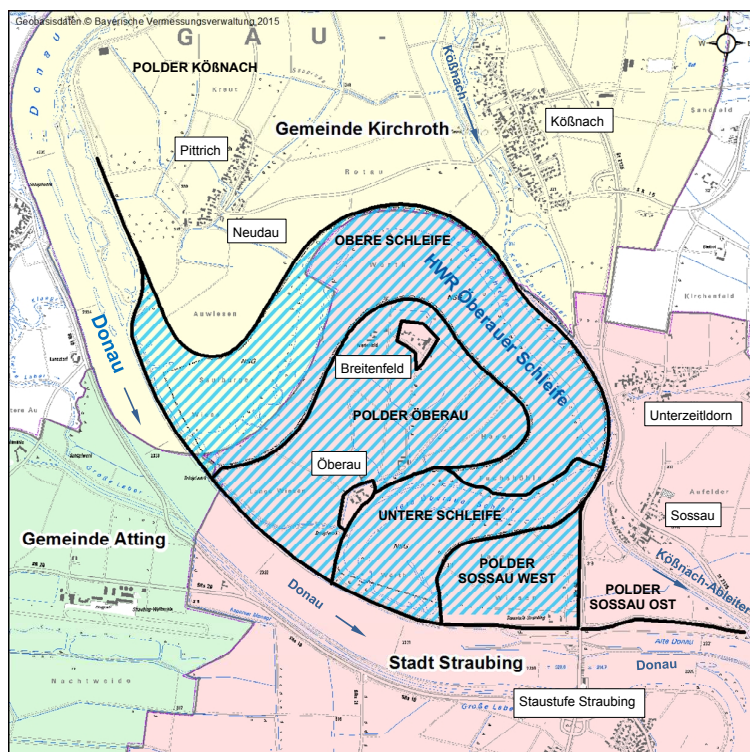


Abbildung 1: Lage der HWR mit Darstellung der geplanten Polderfläche
(INGE LLK, Entwurfsplanung 2019)

1.2 Planungsstand

Da das Vorhaben aufgrund seiner Lage und Größe sowie der zu erwartenden Auswirkungen überörtlich raumbedeutsam ist, wurde ein Raumordnungsverfahren (ROV) durchgeführt, das im Jahre 2013 in Form der Landesplanerischen Beurteilung (LaB) (*Regierung von Niederbayern 2013*) abgeschlossen wurde.

Auf dieser Grundlage wurde im Sommer 2015 die Ingenieurgesellschaft Lahmeyer Hydroprojekt (seit 2018 Tractebel Hydroprojekt GmbH) - Lahmeyer München – Büro Prof. Kagerer im Ergebnis eines VOF-Verfahrens mit der Generalplanung der HWR beauftragt.

Im Rahmen der Vorplanung (*INGE LLK 2018*) wurde eine Favorisierte Planungsvariante erarbeitet, für die im Jahre 2018 ein Scopingverfahren durch-

geführt wurde. Gegenwärtig steht die Entwurfsplanung kurz vor dem Abschluss. Auf dieser Grundlage soll in der 1. Hälfte 2020 die Planfeststellungsunterlage eingereicht werden.

1.3 Art und Umfang des Vorhabens

Mit dem geplanten Vorhaben sollen die bestehenden ungesteuerte Retentionsflächen an der Öberauer Schleife in einen gesteuerten Flutpolder umgewandelt und gleichzeitig zusätzliches Retentionsvolumen geschaffen werden. Insgesamt sollen ca. 14 Mio. Kubikmeter Retentionsraum an der Donau aktiviert werden, um Spitzenabflüsse in der Donau ab einem etwa 30-jährlichen Hochwasserereignis und nach Fertigstellung des Donauausbaus zwischen Straubing und Vilshofen ab einem etwa 100 jährlichen Hochwasserereignis möglichst wirksam zu kappen.

Die Bereiche der Öberauer Schleife innerhalb der ehemaligen Donaudeiche (Altwasser und Vorländer), der Polder Öberau ohne die Ortslagen Öberau und Breitenfeld sowie der Polder Sossau West (westlich der Westtangente) sollen als Flutungsbereiche in die geplante Hochwasserrückhaltung einbezogen werden.



Abbildung 2: Öberauer Donauschleife, *Quelle: WWA Deggendorf*

Die Flutung der Polderbereiche bis zu einem maximalen Stauziel von 320,20 m ü. NHN wird über ein regulierbares Einlaufbauwerk (EBW) etwa bei Donau-km 2333,000 im Bereich der Stauhaltung Straubing erfolgen. Für den Abstau bzw. die Entleerung mit fallender Hochwasserwelle ist ein Auslaufbauwerk (ABW) am Kößnach-Ableiter, der in die Donau mündet, vorgesehen. Innerhalb des Flutpolders sind weitere Bauwerke, wie Deichschlitzungen, Durchlass-

bauwerke, Entleerungskanal usw. zur Befüllung und Entleerung sämtlicher Flutungsbereiche erforderlich, die einen geordneten Befüllungs- und Entleerungsvorgang ermöglichen.

2 2D-Modell für das Oberflächenwasser

Im Rahmen der Erarbeitung der Grundlagen für das Raumordnungsverfahren (ROV) war ein hydraulischen 2D-Modell (*SK/ 2011*) für das Oberflächenwasser erstellt worden, auf dessen Grundlage die Auswirkungen der verschiedenen Varianten zur HWR auf die Wasserstände in der Donau, der Kößnach und in der Öberauer Schleife ermittelt wurden. Als Referenzzustand (Ist-Zustand) wurden die Wasserstände für HQ30 und HQ100 der Donau zugrunde gelegt.

Im Nachgang zum Raumordnungsverfahren wurde das Oberflächenwassermodell von der INGE LLK übernommen und an die Ergebnisse des Verfahrens angepasst. So wurde der Polder Sossau-Ost aus der geplanten Hochwasserrückhaltung herausgenommen, der ursprünglich Antragsgegenstand war. Zusätzlich wurden folgende neue Randbedingungen im Oberflächenwassermodell berücksichtigt:

- Berechnungsszenarien für HQ30, HQ100 und HQ200
- Ganglinien auf Basis der Hochwasserereignisse 2011 und 2013
- Berücksichtigung des Donauausbaus zwischen Straubing – Vils-hofen durch Aktualisierung der W/Q-Beziehung am Auslaufrand bei Donau-km 2317
- Berechnungen für die Ganglinien 1988, 2002 und 2011 erfolgen mit der W/Q-Beziehung der RMD mit Berücksichtigung des Donauausbaus
- Vergleichsrechnungen für das reale Hochwasser 2013 müssen hingegen mit der W/Q-Beziehung ohne Donauausbau der BAW durchgeführt werden
- Abflusskombinationen von Donau und Kößnach (HQ30 Donau/HQ3 Kößnach, HQ100 und HQ200 Donau/HQ1 Kößnach)
- Anfangswasserstände in den beiden Schleifenteilen:
 - Obere Öberauer Schleife = 316,16 m ü. NHN
 - Untere Öberauer Schleife = 315,76 m ü. NHN

Mit dem 2D-Modell wird die Wirksamkeit der HWR im PLAN-Zustand im Vergleich zum IST-Zustand für die HW-Ereignisse 1988, 2002, 2011 für die Lastfälle HQ30, HQ100 und HQ200 untersucht, so wie für das reale Ereignis 2013, das ca. einem 30-jährlichen HW-Ereignis entsprach.

Die Berechnungen zur Wasserspiegelabsenkung auf dieser Grundlage befinden sich aktuell in der abschließenden Bearbeitung und werden voraussichtlich bis Ende Februar abgeschlossen werden.

Im übergebenen 2D-Modell waren Bauwerke als Randbedingung mittels Wasserstands-Abfluss-Beziehung (W-Q-Beziehung) im Modell simuliert worden. Das wurde im Zuge der weiteren Bearbeitung für maßgebende Bauwerke, wie das Ein- und Auslaufbauwerk, geändert. Diese wurden stattdessen als räumliche Bauwerke in das 2D-Modell implementiert. Die Vorteile werden in Kapitel 3.2 erläutert.

3 Variantenuntersuchung zur Lage des Einlaufbauwerks

3.1 Randbedingungen und Entwicklung von Lagevarianten

Maßgebend für eine optimale Scheitelkappung ist die Lage und die Steuerung des Einlaufbauwerkes. Im Rahmen der Vorplanung (*INGE LLK 2018*) fand deshalb zunächst eine intensive Variantenuntersuchung statt, die sich mit der Lage des Bauwerks beschäftigte bevor darauf aufbauend eine Optimierung auf der Grundlage des 2D-Oberflächenwassermodells stattfand.

Als potentieller Untersuchungsbereich für die Anordnung des Einlaufbauwerks wurde der nordwestliche Schenkel der Altwasserschleife an der oberen Schleife zwischen Donau-km 2332,700 und 2333,750 eingegrenzt, s. Abbildung 3.

Bei der Standortwahl für das Einlaufbauwerk wurden folgende Randbedingungen beachtet, wie der Verlauf des linken Stauhaltungsdamms der Donau, das Pittricher Vorland und die Leitwerke in der Donau, die Betriebseinrichtungen der WSV (Heber, Absetzbecken und anschließende Fließstrecke), FFH-Gebiet „Donau und Altwässer zwischen Regensburg und Straubing“ (DE 7040-371), SPA-Gebiet „Donau zwischen Regensburg und Straubing“ (DE 7040-471), geschützte Biotope und Arten, Grabenzüge und Seigen, Anbindung von Wegen und befahrbaren Straßen und die Hochspannungsmasten einer 20 kV-Freileitung.

Unter Beachtung der o.g. Randbedingungen wurden drei Varianten zum Standort (S) des Einlaufbauwerkes (EBW) eingegrenzt, die mit Standortvarian-

te S1, S2 und S3 bezeichnet wurden. Alle Standorte sind mit erheblichen anlage- und betriebsbedingten Beeinträchtigungen von Lebensraumtypen des FFH-Gebietes und von geschützten Arten verbunden, jedoch konnten S1 und S2 zunächst als die Varianten mit geringeren Beeinträchtigungen als S3 eingegrenzt werden.

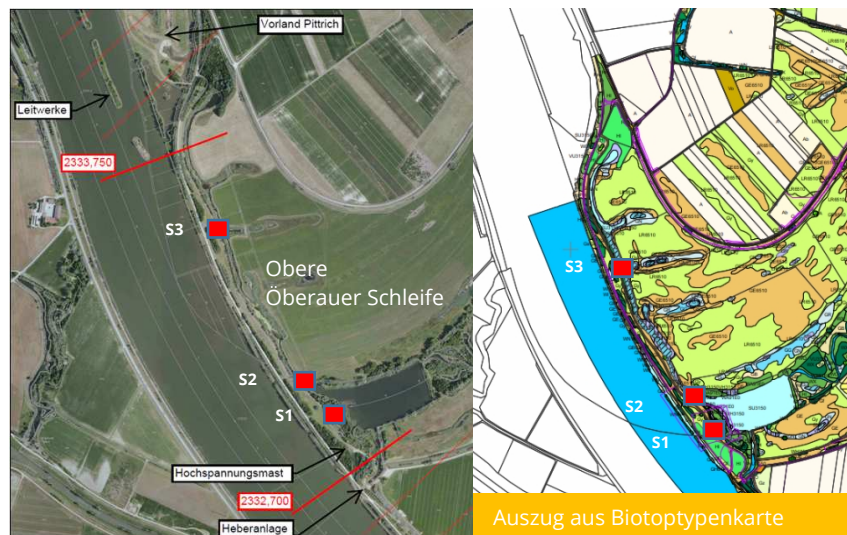


Abbildung 3: Untersuchte Standortvarianten S1 bis S 3 für das Einlaufbauwerk der geplanten Hochwasserrückhaltung gemäß INGE LLK, *Entwurfsplanung 2019*

Entscheidend für die endgültige Abwägung zwischen S1 und S2 war herauszuarbeiten, mit welchem konkreten Standort und welchem Anströmwinkel eine optimale Leistungsfähigkeit des Einlaufbauwerks erreicht werden kann.

3.2 Untersuchungen zur Lage mittels 2D-Modell

Nach der Vorbemessung des EBW wurde das Bauwerk in das 2D-Modell implementiert, siehe Abbildung 4, und für verschiedene Hochwasserwellen berechnet.

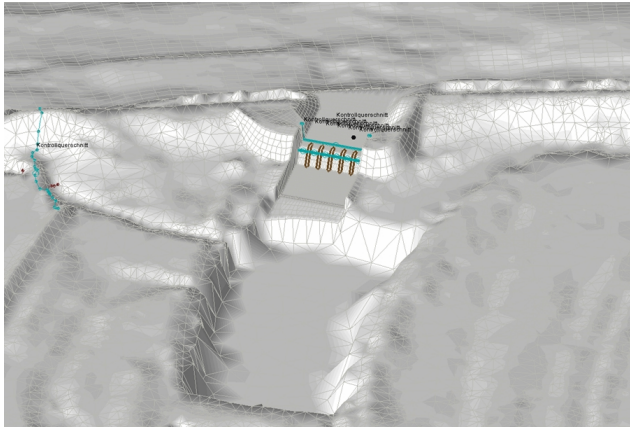


Abbildung 4: 2D modelliertes Einlaufbauwerk mit Absetzbecken, *Quelle: INGE LLK, OW-Modell 2019*

Die Modellerstellung erfolgt mit den Programmen Surface Modelling System (SMS) und LASER_AS-2d. Die Lösung der Flachwassergleichungen erfolgt mit dem Programm HYDRO_AS-2d Version 4.4.

Um das zur Verfügung stehende Retentionsvolumen im Flutpolder am wirkungsvollsten einzusetzen, ist es Ziel der Steuerung, die Hochwasserwelle gezielt zu kappen. Bei bekannter Wellenform lässt sich in Abhängigkeit des nutzbaren Retentionsvolumens der Donauabfluss definieren, ab dem der Abschlag in den Flutpolder erfolgen muss, damit die Wellenspitze optimal gekappt wird (Zielabfluss Donau, QZD). Der über QZD liegende Abfluss muss über das EBW in den Flutpolder einfließen können.

Generell wird bei solchen Fragestellungen die Kappung anhand einer Wasserstands-Abfluss-Beziehung (W-Q-Beziehung) im Modell simuliert, so dass der jeweils zum Zeitpunkt t in den Flutpolder abzugebende Abfluss Q_A in Abhängigkeit des Wasserstands der Donau über eine W/Q-Beziehung definiert wird. Dieser Abfluss Q_A wird an das EBW übergeben. Mit Hilfe eines Ersatzpegels zwischen der definierten W/Q-Beziehung und dem EBW wird geprüft, ob dieser Abfluss das EBW konfliktfrei passieren kann. Solange der Wasserspiegel am Ersatzpegel den Wasserspiegel der Donau nicht übersteigt, ist das EBW ausreichend leistungsfähig. Diese Art der Modellierung kann jedoch nicht die Anströmungswinkel und damit die entstehenden turbulenten Effekte abbilden.

Die Anströmgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der das Wasser auf einen festen Körper zuströmt, bevor dieser die Strömung beeinflusst. Der dynamische Auftrieb und der Strömungswiderstand sind über einen weiten Geschwindigkeitsbereich proportional zum Quadrat der Anströmgeschwindigkeit. Je nach Ausgestaltung der Anströmung und der Anordnung des EBW herrschen im Anströmbereich gleichverteilte und homogene oder ungleichverteilte und heterogene Strömungsbedingungen. Ungleich verteilte Strömungen führen zu einer Leistungsabminderung des EBW. Daher wurden mehrere Simulationen für die Lokalisierung des Einlaufbauwerks und Anpassung des Anströmungswinkels ausgeführt, um eine optimale Kappung zu ermöglichen. In Abbildung 5 wurden exemplarisch 2 Varianten für die Optimierung des Anströmungswinkels dargestellt.

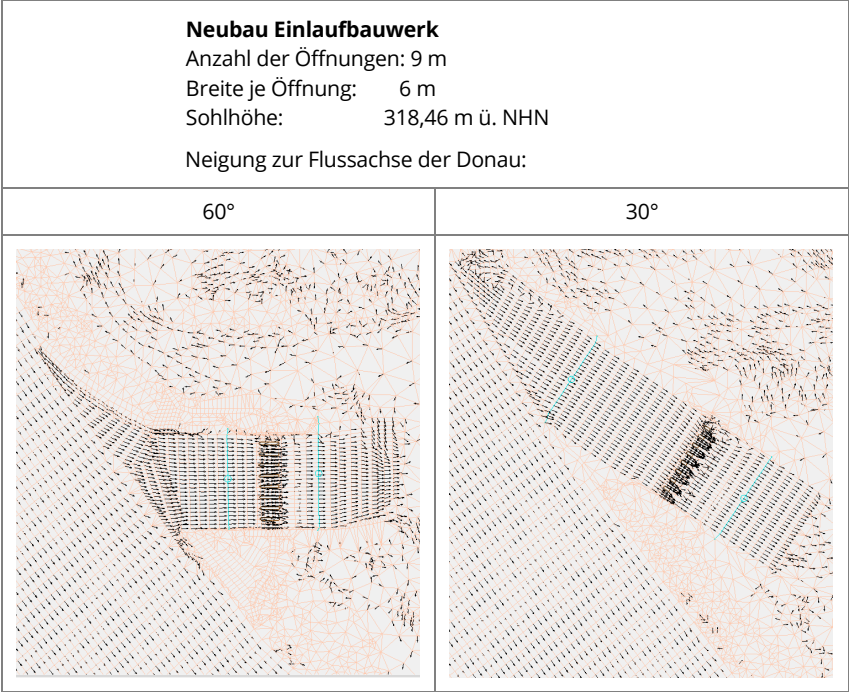


Abbildung 5: Varianten zur Optimierung des EBW – Anströmwinkel, *Quelle: INGE LLK, OW-Modell 2019*

3.3 Ergebnisse der Optimierung

Die Ergebnisse der Optimierung des Anströmwinkels können Abbildung 6 entnommen werden. Es ist ersichtlich, dass durch Änderung des Anströmwinkels die Leistungsfähigkeit des EBW bei gleicher Steuerung um 25% von ca. 200 auf ca. 250 m³/s erhöht werden konnte.

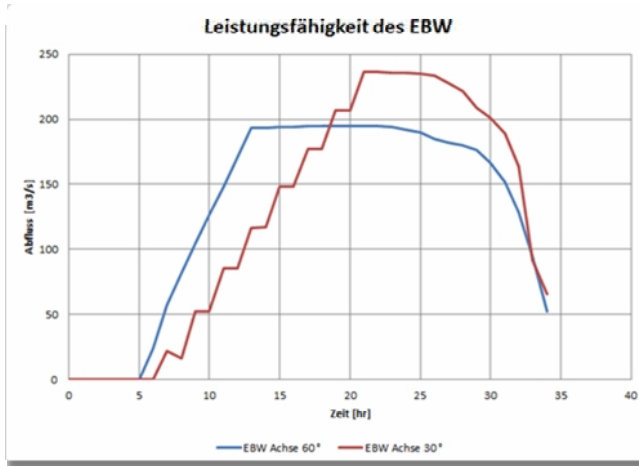


Abbildung 6: Leistungsfähigkeit des EBW für Variante Opt1 und Opt2, Quelle: INGE LLK, OW-Modell 2019

Der ermittelte Anströmwinkel ließ sich aufgrund der vorhandenen Randbedingungen nur am Standort S2 umsetzen, da nur so eine optimale Anbindung des Absetzbeckens und ein Schutz vorhandener Bauwerke und Anlagen möglich war.

Auf dieser Grundlage erfolgte die weitere Planung des Bauwerks, die weiteren hydraulischen Berechnungen und die Ermittlung der damit verbundenen Eingriffe.

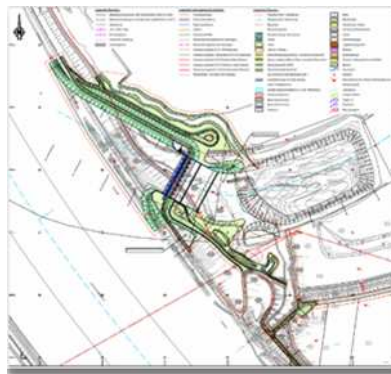


Abbildung 7: Lageplan Einlaufbauwerk, Arbeitsstand Entwurfsplanung (INGE LLK 2020)

4 Literatur

- TU München(2012): Verzögerung und Abschätzung von Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau – Abschlussbericht. Technische Universität München – Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2012
- TU München(2017): Vertiefte Wirkungsanalyse zu Verzögerung und Abschätzung von Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau – Schlussbericht – Teil I. Technische Universität München – Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Juli 2017
- SKI (2012): Hochwasserrückhaltung Öberauer Schleife - Hydraulisches 2D-Oberflächenwassermodell. SKI GmbH + Co.KG, September 2011
- RvN (2013): Landesplanerische Beurteilung (LaB) für die geplante Hochwasserrückhaltung Öberauer Schleife, Az. 24-8277-14. Regierung von Niederbayern / Höhere Landesplanungsbehörde, August 2013
- INGE LLK (2018): Hochwasserrückhaltung Öberauer Schleife, Gewässer Donau (Gew. I) – Vorbericht. Lahmeyer Hydroprojekt – Lahmeyer München – Büro Prof. Kagerer, 14.12.2018
- INGE LLK (2020): Hochwasserrückhaltung Öberauer Schleife, Gewässer Donau (Gew. I) – Entwurf. Lahmeyer Hydroprojekt – Lahmeyer München – Büro Prof. Kagerer, Planungsstand 15.01.2020

Autoren:

Dipl. Ing. Anke Ezzeddine
Geschäftsbereich Weimar
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

Dr. Ing. Salehi Sadaghiani, Mohamad Resa
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

Tel.: +49 3643 746 311
Fax: +49 3543 746 435
E-Mail: anke.ezzeddine@
tractebel.engie.com

Tel.: +49 3643 746 431
Fax: +49 3543 746 435
E-Mail: mohamad.sadaghiani@
tractebel.engie.com

Dipl. Ing. David Biebach
Geschäftsbereich Dresden
Mendelssohnallee 8
01309 Dresden

Rudolf Schneider
Wasserwirtschaftsamt Deggendorf
Sachgebiet 7.2, TWT Frauenau,
Flutpolder Öberauer Schleife
Detterstr. 20
94469 Deggendorf

Tel.: +49 351 21123-20
Fax: +49 351 21123-88
E-Mail: david.biebach@
tractebel.engie.com

Tel.: +49 991 2504-252
Fax: +49 991 2504-200
E-Mail: rudolf.schneider@
www-deg.bayern.de

Wiederherstellung der Hochwasser- sicherheit der Talsperre Lehmühle - physikalische und 3D-numerische Modellierung -

Tilo Buschmann
Carsten Cherubim
Michael Humbsch
Hubertus Milke
Tilo Sahlbach

Die Bemessungszuflüsse der sächsischen Talsperren (TS) haben sich aufgrund der letzten Hochwasserereignisse erheblich vergrößert. Dadurch konnte der Nachweis der Hochwassersicherheit einiger Talsperren nicht mehr erbracht werden.

Die Talsperre Lehmühle wies ein Abflussdefizit der Hochwasserentlastungsanlage (HWE) von 40 % auf. Zur Wiederherstellung der Überflutungssicherheit wurden 2015 die Entnahmeleitungen erweitert. 2017 folgte auf der Grundlage von physikalischen Modellversuchen die Leistungssteigerung des Wehrüberfalls.

Die Strömungsverhältnisse im Tosbecken wurden mittels dreidimensionaler numerischer Berechnungen verdeutlicht. Zusätzlich wurden Varianten zur Optimierung des Tosbeckens untersucht. In Form von kombinierten Leit- und Störkörpern ergab sich eine wirtschaftliche und bautechnisch einfach umzusetzende Maßnahme zur Beruhigung der Strömung. Mit der für 2020 geplanten baulichen Umsetzung werden die Anlagensicherheit und die Leistungsfähigkeit damit signifikant erhöht.

1 Einleitung

Die 1931 fertig gestellte Talsperre Lehmühle südlich von Dresden hat ein Einzugsgebiet von 60 km², einen Gesamtstauraum von 24 Mio. m³ und eine Höhe von 50 m. Sie wurde ursprünglich mit einer Abgabemöglichkeit von 100 m³/s durch die Grundablass- und Entnahmeleitungen mit Talsperrenschiebern und über 100 m³/s über den Kronenüberfall ausgestattet. In den

1980er Jahren wurden die GA- und Entnahmeleitungen im Durchmesser und durch Ringkolbenventile reduziert sowie der Kronenüberfall als Standardprofil ausgebildet. Die im 21. Jahrhundert beobachteten Hochwasserereignisse waren Anlass, die hydrologischen Grundlagen von Talsperren im Freistaat Sachsen zu überprüfen /Amani 2018/. Im Ergebnis dieser Prüfung ging für die Hochwasserentlastung ein Abflussdefizit von 40 % hervor.

Zur Erhöhung der Überflutungssicherheit wurden bis 2015 zunächst die Entnahmeleitungen erweitert. Ergänzend wurde 2017 die Ertüchtigung des Kronenüberfalls der HWE auf Basis physikalischer Modellversuche umgesetzt /IWS 2016/. 2019 wurden die Strömung im Tosbecken dreidimensional numerisch simuliert und Optimierungsmaßnahmen zur Erhöhung der Anlagensicherheit abgeleitet /IWS 2019/.

Im vorliegenden Beitrag werden das physikalische Modell des Kronenüberfalls und das 3D-numerische Tosbeckenmodell vorgestellt, der Optimierungsprozess erläutert und ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Die Untersuchungen wurden für Vollstau, die Bemessungshochwasser 1 und 2 (BHQ1, BHQ2) und Kronenstau (HQmax) durchgeführt.

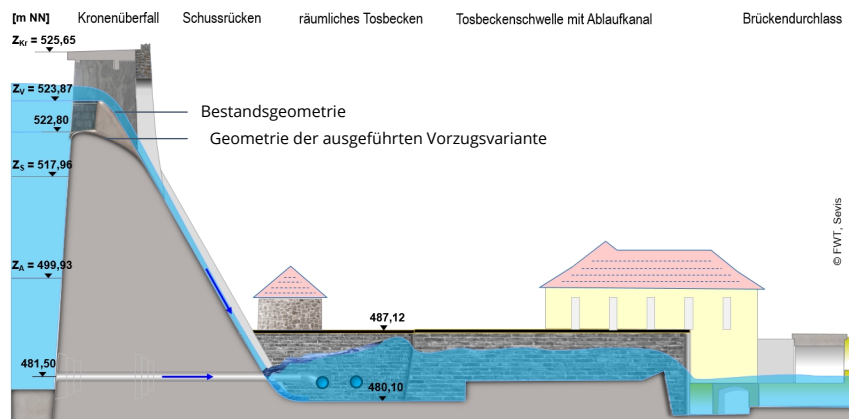


Abbildung 1: Schematischer Längsschnitt durch die HWE der TS Lehmühle

2 Physikalische Modelluntersuchung des Kronenüberfalls

Da insbesondere für Überfallhöhen h_u im Bereich des Brückenunterzugs keine theoretischen Erfahrungen vorlagen und einzelne Überfallfelder aus Bauaufwandsgründen unverändert bleiben sollten, war anfänglich die Überfallcharakteristik $Q = f(h_u)$ zu ermitteln. Im Anschluss wurden einfache

strömungsleitende Einbauten an den Pfeilern und dem Unterzug betrachtet, die jedoch nur geringe Abflusserhöhungen bewirkten. Folglich war zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Überfalls die Absenkung der Wehrkrone einzelner Felder in Kombination mit Anpassungen der Überfallgeometrie angedacht (Abbildung 3). Um Maßstabseffekte zu minimieren, wurden im physikalischen Modell angesichts vorhandener Symmetrieachsen und zur Berücksichtigung des Einflusses zwischen Feldern unterschiedlicher Geometrie 3 der 11 etwa 3 m breiten Felder im Maßstab 1 : 8 abgebildet (Abbildung 2). Das mittlere Feld wurde für Variantenuntersuchungen mit wechselbaren Modulen konzipiert. Bei der untersuchten Strömung mit freier Oberfläche gilt das Froude'sche Modellgesetz.

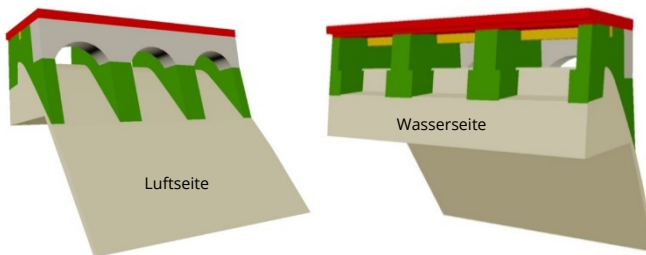


Abbildung 2: Zeichnung des physikalischen Modells im Istzustand

Ein Ziel der Optimierung war es, den Abfluss beim Bemessungshochwasserstauziel, welches sich aus dem erforderlichen Freibord f ableitet, von etwa 100 auf über 135 m³/s zu erhöhen. Ebenfalls sollte der Abfluss durch die abgesenkten Wehrfelder beim bisherigen Vollstauziel (523,87 m NN) den schadlosen Abfluss im Unterlauf (18 m³/s) nicht übersteigen. Damit können die abgesenkten Überfallkronen als oberer ungesteuerter Betriebsauslass definiert und das Vollstauziel beibehalten werden. Auf den Einsatz beweglicher Verschlüsse wurde aus betrieblichen Gründen verzichtet.

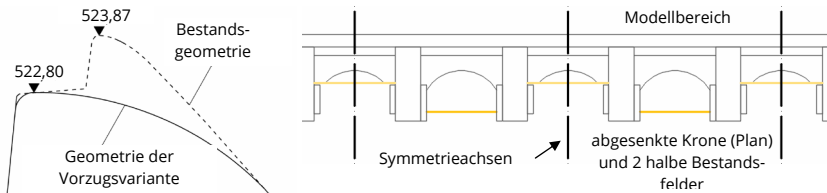


Abbildung 3: Überfallgeometrie (links) und Modellbereich für den Planzustand

Um den Untersuchungsaufwand zu begrenzen, wurde die Absenktiefe der Wehrkrone anhand der Ergebnisse des Istzustandes in Abhängigkeit der Anzahl der abzusenkenden Felder im Vorfeld rechnerisch abgeschätzt.

Die Vorzugsvariante sah für 4 der 11 Wehrfelder die Ausbildung eines nahezu breitkronigen Wehres bei gleichzeitiger Absenkung der Wehrkrone um 1,07 m vor (Abbildung 3). Die bauliche Umsetzung erfolgte 2017 (Abbildung 4) /Amani 2018/, wodurch die Überflutungssicherheit der Mauerkrone wiederhergestellt ist.

Obleich breitkronige Wehre gegenüber der Überfallgeometrie der bestehenden Wehrfelder (ausgerundeter Überfall mit lotrechter Oberwasserseite) geringere Überfallbeiwerte aufweisen, überwogen sowohl aus bautechnischer als auch aus hydraulischer Sicht die Vorteile des breitkronigen Überfalls. Zum einen ist der Abfluss bei Kronenstau am größten, da die Absenkung des Wasserspiegels gegenüber der bestehenden Wehrgeometrie Richtung Wasserseite verschoben und somit ein Zuschlagen des Gewölbes verhindert wird, wodurch wiederum dessen Beanspruchung am geringsten ausfällt. Zum anderen ist die Gefahr bauwerksschädigender Unterdrücke auf dem Wehrrücken geometriebedingt ausgeschlossen. Die erforderlichen Freibordhöhen für die Bemessungshochwasser 1 und 2 werden dabei gewährleistet.



Abbildung 4: Vorzugsvariante im physikalischen Modell (links) und nach Umsetzung an der Talsperre Lehnmühle im Jahr 2017 (rechts)

Die Überfallcharakteristik im Ist- und Planzustandes ist in Abbildung 5 dargestellt. Zu beachten ist der Hysteresebereich, der beim Einstau des Unterzugs der Brücke entsteht. Die beiden Wasserstände gelten für den freien bzw. eingestauten Unterzug.

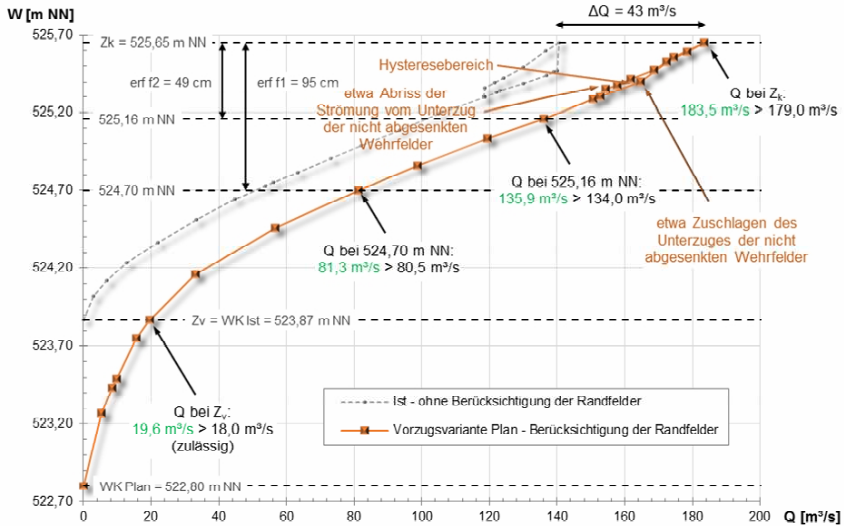


Abbildung 5: Charakteristik des Kronenüberfalls im Ist- und Planzustand

3 Numerische Tosbeckenoptimierung

Die Leistungsfähigkeit des bestehenden Tosbeckens für den Bemessungsfall BHQ1 konnte aus den Erfahrungen des Belastungsfalls Hochwasser 2002 als ausreichend eingeschätzt werden. Aufbauend auf der Masterarbeit /Buschmann 2017/ war die veränderte Aufteilung der Zuflüsse auf Grundlage dreidimensionaler numerischer Berechnungen zu überprüfen und die Strömung zu optimieren, da es bei einer Überströmung der Tosbeckenrandmauern zum Wassereintrich in die Schieberkammern der Stauwehr und des Wasserkraftwerkes kommt. Dies soll auch bei Überschreitung des BHQ1 möglichst lange verhindert werden, um den Betrieb zu gewährleisten.

Die Strömungsberechnungen wurden mit ANSYS CFX unter Verwendung des inhomogenen Free-Surface-Modells durchgeführt. Die Turbulenzmodellierung erfolgte mit dem Shear-Stress-Transport-Modell (SST), welches sowohl wandnah als auch im Inneren des Strömungsfeldes gute Ergebnisse liefert und sich deshalb mittlerweile als Standard für die Turbulenzmodellierung im Wasserbau etabliert hat.

Zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse im Tosbecken war es unzureichend, lediglich das Tosbecken zu modellieren, da die Ergebnisse entscheidend von den bisher unbekannten Bedingungen an den Modellrändern abhängen. Dementsprechend wurde das Untersuchungsgebiet (Tosbecken) sowohl um den Wehrüberfall als auch partiell um das Flussbett der Wilden Weißeritz (Problem: Gewölbebrücke nach dem Tosbecken) erweitert. Aus Gründen der Auflösung des Berechnungsnetzes und der Berechnungszeit wurden 2 Teilmodelle (Überfall- und Tosbeckenmodell) aufgestellt (Abbildung 6).

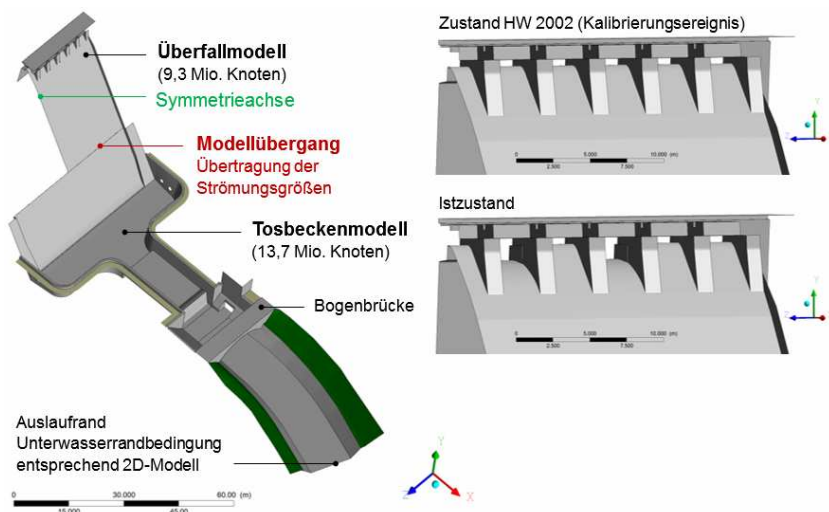


Abbildung 6: numerische Modelle im Überblick

Vor dem Hintergrund gesicherter Ergebnisse ist eine Kalibrierung/ Validierung der aufgestellten Modelle durch den Vergleich der Berechnungen mit Naturdaten oder Ergebnissen physikalischer Untersuchungen erforderlich. Die Modellkalibrierung erfolgte für das Auguthochwasser 2002 für unterschiedliche Rauheiten (10 bis 100 mm). Dabei wurde insbesondere auch der Abfluss auf dem Schussrücken mittels analytischer Verfahren verifiziert. Hierfür waren jedoch im Tosbecken lediglich geringe Unterschiede festzustellen. Sowohl für bekannte Wasserstände als auch visuell zeigten sich insgesamt gute Übereinstimmungen (Abbildung 7). Darüber hinaus veranschaulicht Abbildung 8 die Ähnlichkeit der Ergebnisse der physikalischen und numerischen Modellierung. Somit waren für die weiteren Berechnungen plausible Ergebnisse zu erwarten.

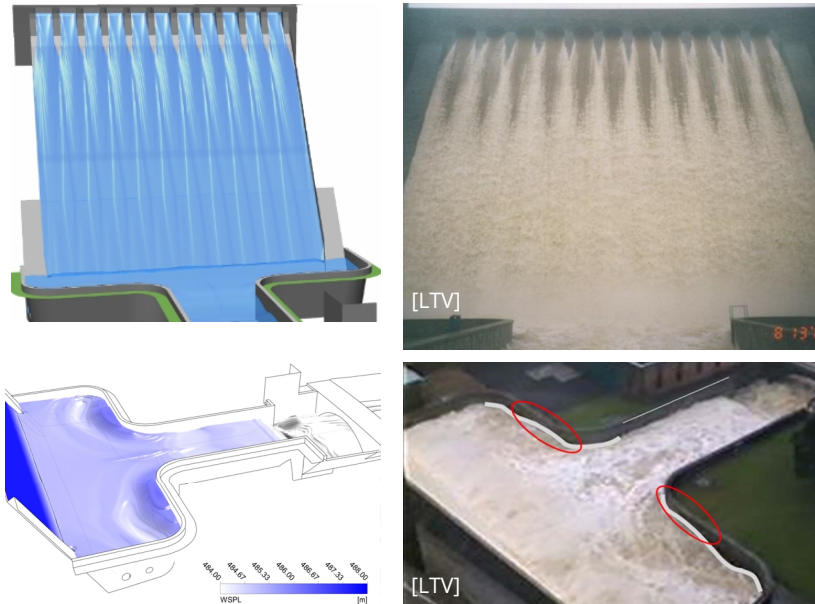


Abbildung 7: Simulationsergebnisse und Fotos für das Augusthochwasser 2020

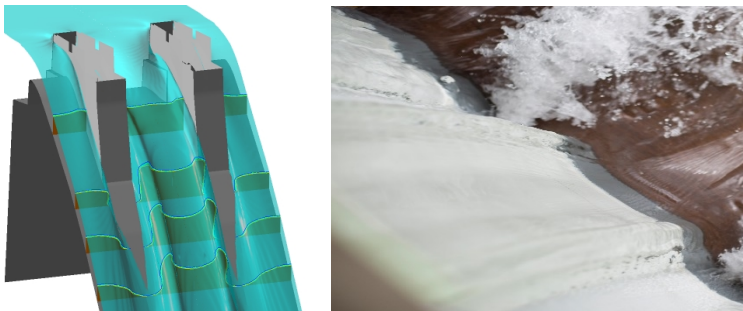


Abbildung 8: visueller Vergleich der Strömung im numerischen und physikalischen Modell für den Planzustand

Der Nachweis des bestehenden Tosbeckens wurde für BHQ1 erwartungsgemäß erbracht. Bei BHQ2 hingegen wird die Tosbeckenwand deutlich überströmt (Abbildung 10), da das vorhandene Wasserpolster den Schussstrahl nicht im erforderlichen Maß abbremst, dieser bis zur Tosbeckenwand durchschlägt und nach oben abgelenkt wird. Als Optimierungsziel wurde daraufhin ein Mindestfreibord für die Tosbeckenwand von 20 cm bei BHQ2 formuliert.

Die Strömungsoptimierung wurde für BHQ₂ in 10 Varianten untersucht. Dabei wurden verschiedene Maßnahmen bzw. Kombinationen auf Grundlage stationärer Berechnungen bewertet (Abbildung 9).

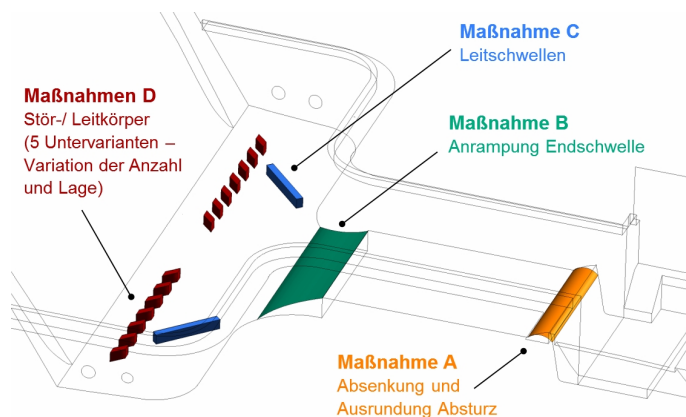


Abbildung 9: Varianten zur Tosbeckenoptimierung im Überblick

Die Vorzugsvariante D5 sieht die Anordnung von 2 x 5 Stör-/ Leitkörpern (Höhe 0,90 m) vor. Sie geht bei geringem baulichen Aufwand mit der größten Wirkung (Freibordgewinn > 1 m) einher. Der energiereiche Schussstrahl wird aufgerissen und zur Mitte und nach oben abgelenkt. Unmittelbar hinter den Störsteinen ist die Fließgeschwindigkeit stark verringert. Die Hauptströmung verläuft optimal in der Mitte des Tosbeckens (Abbildung 11). Ein Überströmen der Randmauern bleibt somit auch bei BHQ₂ mit ausreichender Sicherheit (minimaler Freibord $f_{\min} = 0,47$ m) aus (Abbildung 10). Bei HQ_{max} wird der Abfluss über die Tosbeckenwand (Q_{TBW}) um 93 % von 37,8 auf 2,4 m³/s reduziert, wodurch das Risiko einer Überflutung der luftseitigen unterirdischen Anlagen der LTV (Schieberkeller der Staumauer) und der Rohrkeller der benachbarten Wasserkraftanlage signifikant verringert wird.

Die Vorzugsvariante wurde aufgrund der starken Wellenbildung im Tosbecken zusätzlich durch instationäre Simulationen sowie für unterschiedliche GA-Zuflüsse überprüft. Als Bewertungskriterien dienten der Freibord f_{\min} und der Abfluss über die Tosbeckenwand Q_{TBW} .

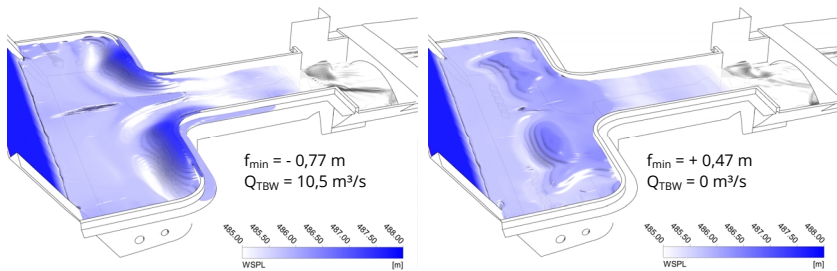


Abbildung 10: Wasserspiegellagen des Istzustandes (links) im Vergleich zur Vorzugsvariante D5 für BHQ₂

Gleichwohl numerische Modelle gewissen Unsicherheiten unterliegen, liefert der relative Vergleich zweier Berechnungen eine sehr gute Aussage über die Wirkung geometrischer Veränderungen, da alle Berechnungen auf den gleichen Ansätzen beruhen.

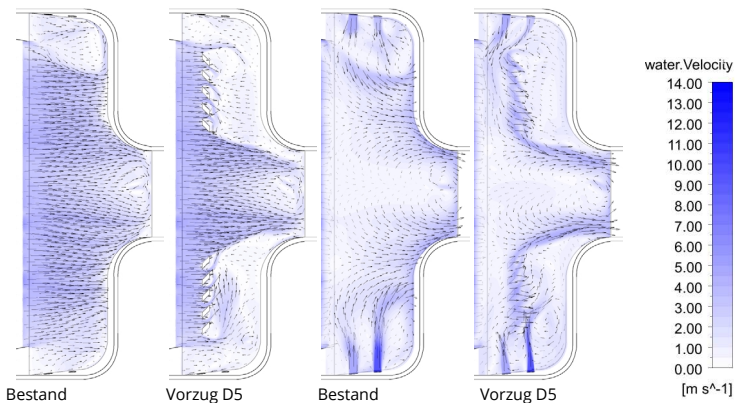


Abbildung 11: Vergleich der Horizontalgeschwindigkeiten im Tosbecken (Sohle 480,10 m NN) für die Schnitt Ebenen 480,50 m NN (links) und 482,00 m NN (rechts)

4 Fazit

Für die Hochwasserentlastung der Talsperre Lehmühle wurden zur Wiederherstellung der Hochwassersicherheit physikalische und numerische Modellierungen durchgeführt. Durch detaillierte Variantenuntersuchungen konnten hydraulisch sowie betrieblich optimale und zugleich wirtschaftliche Lösungen entwickelt werden.

Das Projekt verdeutlicht das hohe Einsparpotential. Denn den Kosten für die Modellierung stehen erfahrungsgemäß ungleich höhere Baukosteneinsparungen gegenüber. Einfache analytische Berechnungen sind aufgrund der komplexen Strömungen meist nicht zielführend und ziehen bei hohen Sicherheiten in den Annahmen oft höhere bauliche Aufwendungen nach sich. Darüber hinaus bieten insbesondere physikalische, aber auch numerische Modelle eine hohe Verlässlichkeit der Ergebnisse. Letztere geben zudem detaillierte Einblicke in die Strömung.

Die bauliche Umsetzung des Überfalls erfolgte 2017. Die Realisierung der Anpassungen im Tosbecken ist 2020 vorgesehen, womit sich die Anlagensicherheit und die Leistungsfähigkeit signifikant erhöhen.

5 Literatur

- Amani, E.; Winkler, U.; Bielitz, E. (2018): Anpassung von Stauanlagen im Osterzgebirge an veränderte Bemessungshochwasserzuflüsse. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 2018, Heft 60: 287 - 296
- Buschmann, T. (2017): Dreidimensionale numerische Modellierung von Hochwasserentlastungsanlagen. Masterarbeit, Leipzig 2017
- IWS (2016): Talsperre Lehmühle, Hydraulische Modellversuche an den Anlagen der Hochwasserentlastung zur Wiederherstellung der Überflutungssicherheit (VÜ46), Leipzig 2016
- IWS (2019): Talsperre Lehmühle, Wiederherstellung der Überflutungssicherheit - Ermittlung der hydraulischen Verhältnisse in der Hochwasserentlastungsanlage, Leipzig 2019

Autoren:

M.Sc. Tilo Buschmann
Prof. Dr.-Ing. Hubertus Milke
M.Sc. Tilo Sahlbach

Institut für Wasserbau und
Siedlungswasserwirtschaft
Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig

buschmann@iws.htwk-leipzig.de
milke@iws.htwk-leipzig.de
sahlbach@iws.htwk-leipzig.de

Dipl.-Ing. Carsten Cherubim

Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Pirna
Referat Technische Überwachung

Carsten.Cherubim@ltv.sachsen.de

Dipl.-Ing. Michael Humbsch

Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Dresden
Betrieb Oberes Elbtal

Michael.Humbsch@ltv.sachsen.de

3-D-FE-Modellierung für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern

Kristina Aldermann
Uwe Beetz
Christian Bellak

Beim Zuverlässigkeitsnachweis für Absperrbauwerke von Stauanlagen ist gemäß DIN 19700-11 (2004) nachzuweisen, dass sie als Ganzes tragsicher sind. Dabei ist das Zusammenwirken von Bauwerk und Untergrund zu berücksichtigen. Eine 3-D-, mindestens aber eine 2,5-D-Modellierung ist dabei unumgänglich. Am Beispiel der kombinierten Bogen-Gewichts-Staumauer der Okertalsperre im Harz werden die Herausforderungen innerhalb der FE-Modellierung veranschaulicht. Es wird die Umsetzung der notwendigen Idealisierung verdeutlicht sowie die Schwierigkeit der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten innerhalb der FEM-Berechnungen dargestellt.

Stichworte: Zuverlässigkeitsnachweis, Bogenstaumauer,
3-D-FEM-Berechnung, DIN 19700-11, DWA-M 542,
Teilsicherheitsbeiwerte

1 Allgemeine Informationen zur Okertalsperre

Die Okertalsperre wurde zwischen 1952 und 1956 gebaut. Die Okertalsperre ist eine 75 m hohe, 8 m breite und 260 m lange, kombinierte Bogen- und Gewichtsstaumauer aus Beton (Abbildung 1). Die Bogenmauer hat eine Höhe von 61 m, einen Öffnungswinkel von ca. 110° und besteht aus zehn einzelnen Blöcken mit fünf seitlich angeordneten, verbreiterten Blöcken, welche die Kräfte des Bogens in das Gebirge übertragen. Aufgesetzt ist eine Gewichtsmauer mit einer Höhe von 14 m mit Flügeln, aus acht weiteren Blöcken bestehend, welche die Talbereiche abriegeln, die durch die Bogenmauer nicht abgeschlossen werden. Aufgrund der Höhe des Absperrbauwerkes von 75 m über der Gründungssohle (> 15 m) und der Größe des Stauraumes von 48,27 Mio. m³ (> 1,0 Mio. m³) gehört die Okertalsperre nach DIN 19700-11 (2004) zur Talsperrenklasse 1. Sie wird von der Harzwasserwerke GmbH betrieben. Tractebel Hydroprojekt GmbH führte die

Vertiefte Überprüfung der Okertalsperre von 2017 bis 2019 durch. Dazu gehörte auch die Aktualisierung der Zuverlässigkeitsnachweise, welche im September 2019 abgeschlossen wurde.

2 Maßgebende Normen und Regelwerke

Nach *DIN 19700-11 (2004)* soll die Nachweisführung bei Standsicherheitsberechnungen von Talsperren nach dem Gesamtsicherheitskonzept (GSK) erfolgen. Zusätzlich wird aber darauf hingewiesen, dass die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes (TSK) möglich ist, wenn das gleiche Sicherheitsniveau gewährleistet wird. Zur Umsetzung dieser Forderung wurde das DWA-Merkblatt 542 (2017) erarbeitet. Nach *DIN 19700-11 (2004)* ist die Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund in den Nachweis der Sicherheit einzubeziehen. Die Erfassung dieser Wechselwirkung fordert die Anwendung eines kontinuumsmechanischen Berechnungsverfahrens, z.B. die „Finite Elemente Methode“ (FEM). Mit diesem Verfahren sind neben statischen Spannungs-Verformungsberechnungen auch die erforderlichen dynamischen Berechnungen der Erdbebeneinwirkung sowie Potentialberechnungen der Durchströmung und Temperatureinwirkung möglich. Die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes birgt zusätzlichen Aufwand bei Berechnungen mit der FEM für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern.



Abbildung 1: Luftseitige Ansicht der einfach gekrümmten Bogenmauer der Okertalsperre

3 Herausforderungen bei der Anwendung von FE-Modellen

Die Grundlage für Standsicherheitsberechnungen von Staumauern ist ein Modell. Das Modell umfasst mehrere Teile:

1. Geometrie von Bauwerk und Gelände
2. Randbedingungen am geometrischen Modell
3. Beschreibung der Materialien durch geeignete Stoffmodelle sowie Bestimmung zugehöriger Materialkennwerte
4. Beschreibung der Einwirkungen
5. Steuerung der Berechnung
6. Auswertung und Visualisierung der Berechnungsergebnisse

In allen Modellebenen sind Idealisierungen erforderlich. Damit wird die Realität zum Modell.

3.1 Erstellung des geometrischen Modells

Der Umfang der notwendigen Idealisierung wird maßgeblich durch das zu untersuchende Bauwerk bestimmt. Hierzu gehört ebenso die Entscheidung ob ein 2-D-, 2,5-D- oder 3-D-Modell nötig ist. Um der Forderung nachzukommen, die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Untergrund realistisch abzubilden, muss bei Zuverlässigkeitsnachweisen von Staumauern auf Fels mindestens ein 2,5-D-Modell erstellt werden. Nur so können die Eigenschaften des Gebirges, wie Trennflächen und ein mögliches Versagen oder Abgleiten auf diesen im Untergrund, abgebildet werden. Im Modell der Okertalsperre gibt es keine kinematisch relevanten Trennflächen. Hier besteht die Schwierigkeit die komplexe Geometrie des Bauwerkes im Modell abzubilden (Abbildung 2). Da es sich bei der Okertalsperre um eine Bogenstaumauer handelt und sich bei einer gekrümmten Mauerachse eine räumliche Tragwirkung einstellt, ist hier eine 3-D-Berechnung der gesamten Staumauer und des Untergrundes unerlässlich.

3.2 Randbedingungen am geometrischen Modell

Die Dimension des Modells bestimmt die notwendigen Randbedingungen. Diese sind erforderlich in Richtung aller drei Koordinatenachsen. Bei dem 3-D-FE-Modell der Okertalsperre wurde der untere Modellrand unverschieblich in Richtung aller drei Koordinatenachsen festgelegt, wohingegen die seitlichen Modellränder unverschieblich in Richtung der Flächennormalen definiert wurden.

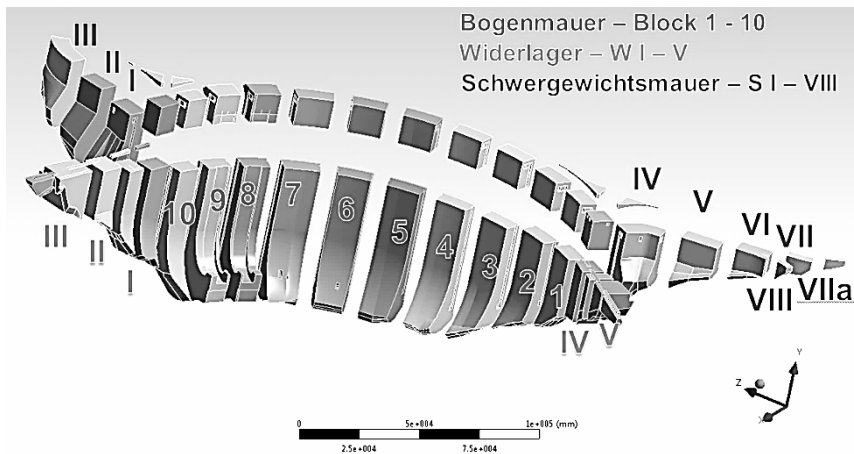


Abbildung 2: Ansicht der Einzelkomponenten des modellierten Absperrbauwerkes der Okertalsperre

3.3 Auswahl von Stoffmodellen und Bestimmung der Materialkennwerte

Das Verhalten des Absperrbauwerkes der Okertalsperre und des Untergrundes wird mit der FEM in Verbindung mit genügend zutreffenden Stoffgesetzen entsprechend den gegenwärtig a. a. R. d. T. hinreichend genau berechnet. Fels besteht aus Gestein, dessen Zusammenhalt durch Trennflächen örtlich reduziert bzw. aufgehoben wird. Die Abbildung des Gefüges im Modell ist die Voraussetzung für eine felsmechanische Untersuchung. Damit ist eine realitätsnahe Beschreibung des Spannungsdehnungsverhaltens des Felses möglich. Die Trennflächenscharen im Untergrund können diskret, als räumlich orientierte Materialeigenschaft oder durch Angabe von Kennwerten für den Fels mit den darin enthaltenen Trennflächen modelliert werden. Bei der Okertalsperre ist die Wirkung der Trennflächen bereits in den Materialdaten für den Fels enthalten. Die Trennflächen stellen die maßgebenden Wasserwege im Gebirge dar. Die Modellierung erfolgt durch Ansatz von insitu bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten für das Gebirge. Gerade im Talsperrenbau ist die Sickerströmung im Fels von besonderer Bedeutung, weil diese die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit beeinflusst. Außerdem sind Abdichtungs- und Drainagemaßnahmen des Felsuntergrundes durch Angabe entsprechender Durchlässigkeitsbeiwerte oder Randbedingungen anzugeben.

Die Materialeigenschaften, beschrieben durch Kennwerte für wahrscheinliche und ungünstige Bedingungen für die gewählten Stoffgesetze und die Wirksamkeit baulicher Einrichtungen, werden in den zugehörigen Bemessungssituationen betrachtet.

3.4 Beschreibung der Einwirkungen und Steuerung der Berechnung

Abhängig von der jeweiligen Bemessungssituation nach *DWA-M 542 (2017)* werden verschiedene Einwirkungskombinationen erstellt, welche am geometrischen Modell beschrieben werden müssen. Jede voneinander unabhängige Einwirkung wird innerhalb der Berechnung in einem separaten Lastschritt definiert. Die zeitliche Reihenfolge muss dabei sinnvoll festgelegt werden. Dies ist ein maßgeblicher Bestandteil, um die Berechnung richtig zu steuern. Gleichmaßen gehört dazu die Steuerung der nichtlinearen Berechnung durch die Wahl eines geeigneten Iterationsverfahrens. Die Steuerung der Iteration beeinflusst die Qualität der Ergebnisse, die Rechenzeit und den Speicherplatzbedarf maßgeblich.

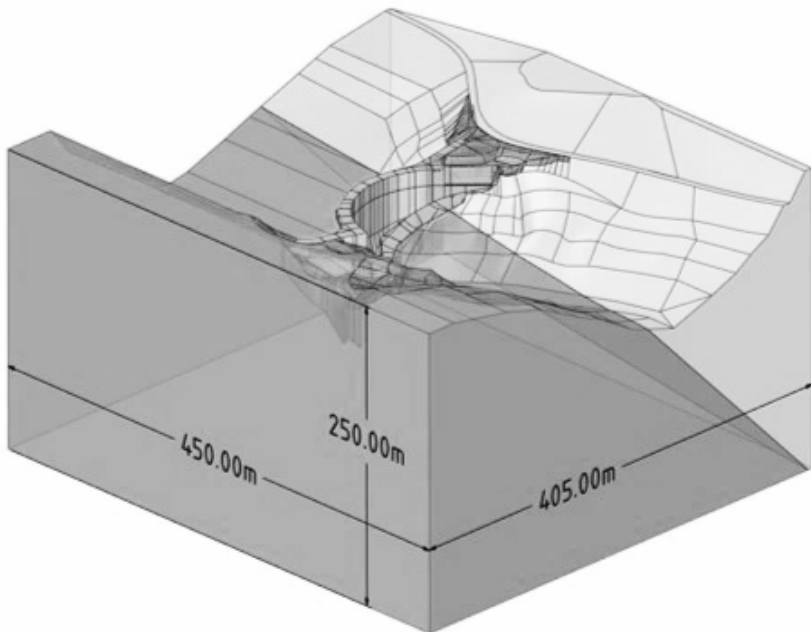


Abbildung 3: Isometrische Ansicht mit Modellabmessungen der Okertalsperre

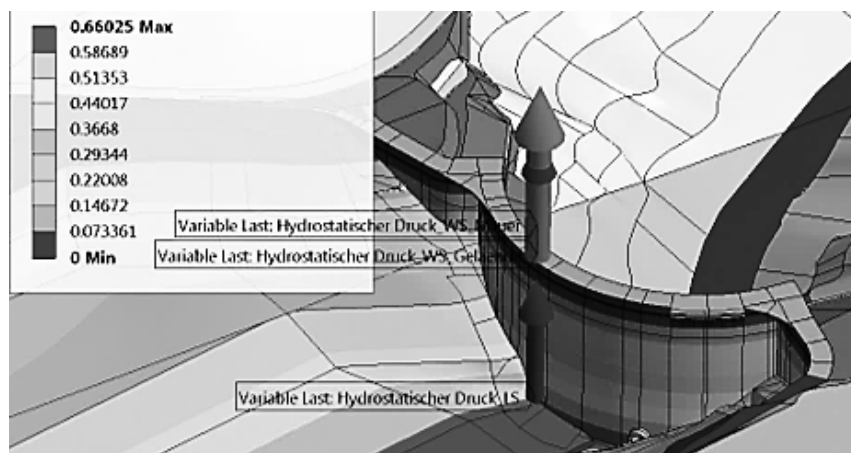


Abbildung 4: Beschreibung der Einwirkungen – hydrostatischer Wasserdruck

3.5 Auswertung und Visualisierung der Berechnungsergebnisse

Um eine gezielte Ergebnisauswertung vornehmen zu können, muss meistens schon in der Modellierungsphase entsprechend darauf Einfluss genommen werden. Primär ist eine feinere Vernetzung in Bereichen mit großen Gradienten der Zustands- und Wirkungsgrößen nötig. Je näher man an den Modellrand kommt, umso gröber kann die Vernetzung werden, da hier die Einflüsse des Bauwerkes weitestgehend abgeklungen sein sollten. Hierbei ist es wichtig, die Modellabmessungen im Untergrund so zu wählen, dass maßgebende Einflüsse auf das Kontinuum weitgehend abgeklungen sind (Abbildung 3). Bereiche im Untergrund, welche schon als Problembe-
reiche diagnostiziert wurden, sei es in der Bauwerksüberwachung (bei bestehenden Bauwerken) als auch durch Baugrundgutachten, sollten in ihrem Grad der Detailgenauigkeit entsprechend berücksichtigt werden. Außerdem sind unabhängig von den genannten Gesichtspunkten auch Orte im Modell feiner zu vernetzen, wo die maßgebenden Nachweise für den Zuverlässigkeitsnachweis erwartungsgemäß zu führen sind.

3.6 Zusammenspiel von Datengrundlage und Idealisierungsgrad

Bei bestehenden Bauwerken ist es oftmals schwierig, die erforderliche Datengrundlage zu beschaffen, da für die Umsetzung sowohl Angaben über die derzeitigen sowie über die vor dem Bau der Staumauer vorhandenen Gelände-verhältnisse notwendig sind. Aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens von Fels muss auch die Belastungsgeschichte im Modell berück-

sichtigt werden. Dazu ist es notwendig folgende Bauphasen innerhalb der Berechnung in einzelnen Lastschritten abzubilden:

1. Gelände vor Aushub der Baugrube mit primärem Spannungszustand,
2. Gelände mit Baugrubenaushub und
3. Bau der Staumauer mit Geländeanpassung (Straße, Parkplatz, Auffüllung etc.).

Anschließend kann die Berechnung weiterer Lastschritte, wie Einstau mit Durchströmung, Temperatur, Eis etc. erfolgen. Eine hohe Detailgenauigkeit ist nur dann sinnvoll, wenn die Grundlage auf vorhandenen Informationen und nicht auf Annahmen beruht. Folgende Details wurden bei der Modellierung des 3-D-FE-Modells der Okertalsperre umgesetzt: Detailgenauigkeit in der Gründungssohle, Berücksichtigung der vorhandenen Hohlräume, Ausbildung der vorhandenen Fugen, Fahrbahnausbildung sowie der Übergang der Widerlager in das anschließende Gelände. Details wie z.B. die Brüstungen entlang der Mauerkrone wurden im Modell der Okertalsperre nicht abgebildet, weil sie hinsichtlich der Beurteilung der Gesamtstandsicherheit zu vernachlässigen sind (Abbildung 4).

4 Angaben zum FE-Modell der Okertalsperre

Das 3-D-FE-Modell der Okertalsperre besteht aus 172 Einzelkörpern, 580 214 Elementen und 877 327 Knoten. Die Lage der Modellränder wurde so gewählt, dass die Einflüsse des Bauwerkes im Untergrund weitestgehend abgeklungen sind. Die Modellabmessungen des FE-Modells der Okertalsperre betragen von der Wasser- zur Luftseite 450,00 m, von dem rechten zum linken Hang 405,00 m und in der Höhe 250,00 m. Zwischen allen sich berührenden Körpern wurden Kontakte definiert, welche die Berührungsflächen miteinander koppeln. Diese Vorgehensweise lässt es zu, jeden Einzelkörper unabhängig von den anderen Körpern zu vernetzen. Aufgrund der sehr komplexen Bauwerksgeometrie sowie einer hohen Detailgenauigkeit in der Gründungssohle war diese Vorgehensweise im konkreten Fall unumgänglich. In Hinblick auf die Rechenzeit wirken sich Kontakte negativ aus. Im Zuge der Modellerstellung sollte deshalb die Notwendigkeit einer hohen Detailgenauigkeit sorgfältig abgewogen werden.

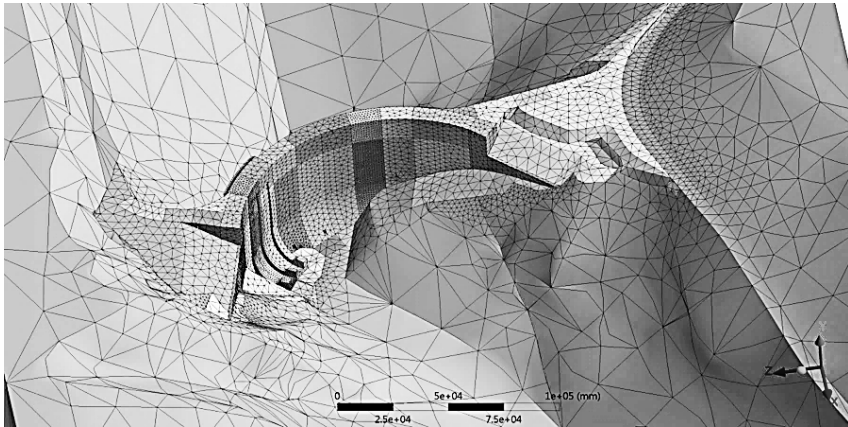


Abbildung 5: 3-D-FE-Modell der Okertalsperre – Ausschnitt der Mauer

5 Ansatz des Teilsicherheitskonzeptes

Die Anwendung des TSK birgt zusätzliche Aufwendungen bei FEM-Berechnungen für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern. Da die Teilsicherheitsbeiwerte zum Teil bereits innerhalb der Berechnung angesetzt werden, mindestens bei den Materialeigenschaften und den Einwirkungen, hat dies zur Folge, dass es nicht ausreicht, nur eine Berechnung für jede zu untersuchende Bemessungssituation vorzunehmen. Bei Ansatz des GSK war es hinreichend, jeden Lastfall genau einmal zu berechnen, da die Auswertung der Sicherheit erst innerhalb der Nachweisführung erfolgt, dann mit Ansatz unterschiedlicher Sicherheitsanforderungen je nach Lastfall und Nachweis. Mit Ansatz des TSK ergibt sich die Problematik, dass die unterschiedlichen Nachweise innerhalb einer Bemessungssituation verschiedene Teilsicherheitsbeiwerte erfordern, so dass jede Bemessungssituation mehrfach mit Ansatz verschiedener Teilsicherheitsbeiwerte berechnet werden muss. Außerdem sind gleiche Berechnungsschritte in verschiedenen Bemessungssituationen auch mit verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerten zu belegen. Dies birgt nicht gleich ersichtliche Fehlerquellen sowie einen enorm gestiegenen Rechenaufwand. Bei einem kleinen Modell mag das nicht relevant sein, bei einem 3-D-FE-Modell, wie dem der Okertalsperre, bedeutet dies eine Vervielfachung einer ohnehin sehr langen Rechenzeit.

6 Zusammenfassung

Die Aufstellung von Zuverlässigkeitsnachweisen für Staumauern erfordert i.d.R. kontinuumsmechanische Berechnungen. Darin muss das Zusammenwirken von Bauwerk und Untergrund abgebildet werden. Bei der Modellierung ist es erforderlich, die Realität durch Idealisierungen abzubilden. Die Idealisierung betrifft alle Schritte der Zuverlässigkeitsnachweise. Der Grad der Detailgenauigkeit bei FE-Modellen für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Diese werden durch die Geometrie des Bauwerkes und die vorhandene Datengrundlage sowie durch die Notwendigkeit der gezielten Ergebnisauswertung in unterschiedlichen Bereichen des Modells gleichermaßen bestimmt. Dabei sind in Vorüberlegungen bereits alle Schritte als Komplex zu betrachten. Insgesamt ist festzustellen, dass sich durch Erfahrung und gezielte Überlegungen im Vorfeld der Modellerstellung umfangreiche Nacharbeit bzw. Überarbeitung oftmals vermeiden lässt. Je umfangreicher und komplizierter das Bauwerk, umso anspruchsvoller ist diese Aufgabe. Trotz aller genauen Überlegungen im Vorfeld, lässt es sich nicht immer vermeiden, einen ersten Rechnungslauf durchzuführen, um Problembereiche zu diagnostizieren und dann eine Überarbeitung des Modells entsprechend vorzunehmen.

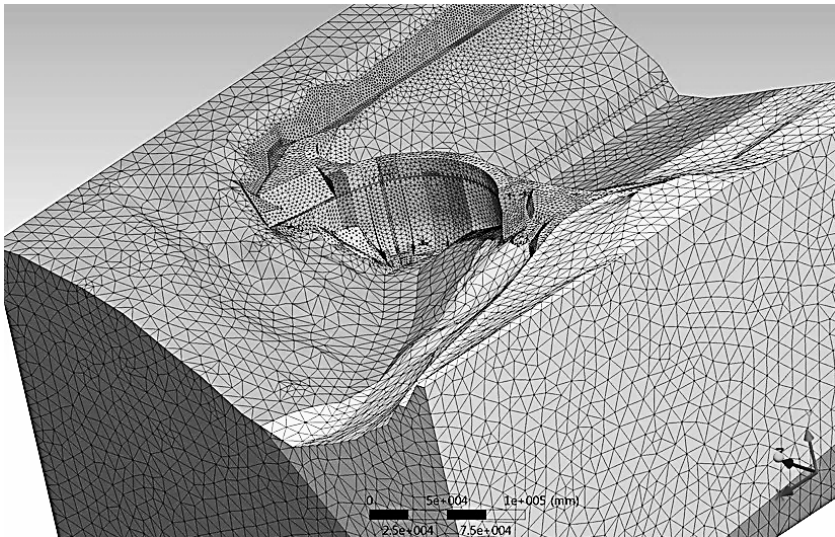


Abbildung 6: 3-D-FE-Gesamtmodell der Okertalsperre

7 Literatur

DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen – Teil 11: Talsperren. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2004

DWA-M 542 (2017): Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten für Staudämme und Staumauern. Siebengebirgsdruck, Bad Honnef 2017

Autoren:

Dipl.-Ing. Kristina Aldermann
Dipl.-Ing. Uwe Beetz

Dipl.-Ing. Christian Bellak

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Geschäftsbereich Dresden
Mendelssohnallee 8
01309 Dresden

Harzwasserwerke GmbH
Abteilung Talsperren
Nikolaistraße 8
31137 Hildesheim

Tel.: +49 351 21123 32
Fax: +49 351 21123 88
E-Mail: kristina.aldermann@
tractebel.engie.com
uwe.beetz@
tractebel.engie.com

Tel.: +49 5121 404 235
Fax: +49 5121 404 220
E-Mail: bellak@
harzwasserwerke.de

Hydraulische sowie 1D und 3D numerische Modellierung einer Flutwelle in einer Schlucht

Andrea-Kristin Bachmann
Jürg Speerli
Walter Clausen

Der infolge eines Staumauerbruchs resultierende maximale Flutwellenabfluss wird mit einer hydraulischen Modelluntersuchung sowie mit numerischer 1D und 3D Modellierungen ermittelt. Direkt unterhalb der Staumauer liegt eine enge Schlucht, wodurch der maximale Flutwellenabfluss stark gedämpft wird. Die Beschaffung der notwendigen Grundlagendaten mit modernen digitalen Werkzeugen und Methoden und das daraus generierte digitale Oberflächenmodell werden erläutert. Das digitale Oberflächenmodell ist die Grundlage für die Durchführung der verschiedenen Modellierungsansätze. Die Ergebnisse des Flutwellenabflusses am unteren Ende der Schlucht liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Die verwendeten Modellierungsansätze werden diskutiert und eine Schlussfolgerung und Empfehlung abgegeben.

Stichworte: Hydraulische Modellierung, Numerische Modellierung, Digitales Oberflächenmodell, Staumauerbruch, Flutwelle

1 Einleitung und Situation

Die Massa ist ein Wildbach im Kanton Wallis, Schweiz und entwässert ein stark vergletschertes Einzugsgebiet mit dem Grossen Aletschgletschers als Hauptgletscher und mündet oberhalb von Brig in die Rhone. Der Grosse Aletschgletscher ist der flächenmässig grösste und längste Gletscher der Alpen. Neben Schmelzwasser transportiert die Massa auch sehr viele Sedimente. An der Massa befindet sich die Wasserkraftanlage Electra Massa bestehend aus dem Gebidem Stausee, einem Triebwassersystem sowie einer Kavernenzentrale mit Unterwasserkanal zur Rhone (Abb. 1). Infolge des hohen Sedimentanfalls wird der Gebidem Stausee jährlich entleert und

eine Freispiegelspülung durchgeführt. In den letzten 20 Jahren wurden so jährlich zwischen 300'000 und 400'000 m³ Sedimente gespült, wovon ca. 30'000 m³ gröberes Geschiebe in einem Sedimentbecken am Ende der Massaschlucht zwischengespeichert und später ausgebeutet werden (Abb. 2). Der Rest gelangt über den rund 700 m langen Massakanal in die Rhone. Das Sedimentbecken wird durch eine schlanke Staumauer geschaffen (Abb. 3) und ist Bestandteil eines Kieswerks. Die Staumauer wurde in den Jahren 1950/1960 erstellt.

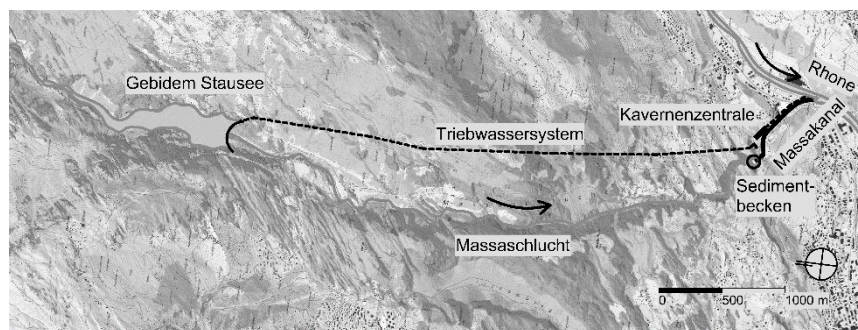


Abbildung 1: Situation mit der Wasserkraftanlage Electra Massa, der Massaschlucht, des Sedimentbeckens, des Massakanals und der Rhone.

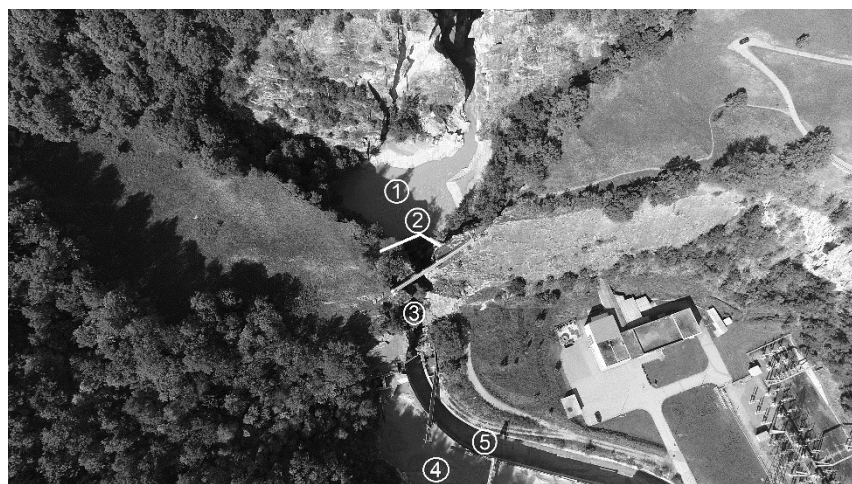


Abbildung 2: Situation mit dem Sedimentbecken **t**, der Staumauer **u** (weiss markiert), der unteren Massaschlucht **v**, des Kieswerks **w** und des Massakanals **x**.

Die Beaufsichtigung von Talsperren obliegt in der Schweiz dem Bundesamt für Energie (BFE). Falls die Höhe und das Volumen des aufgestauten Wassers es zulassen und keine besondere Gefährdung vorliegt, kann eine Talsperre aus der Bundesaufsicht entlassen und der kantonalen Aufsicht unterstellt werden (BWG 2002, BFE 2015). Um festzustellen, ob eine besondere Gefahr vorliegt, ist eine Flutwellenberechnung als Folge eines spontanen Staumauerbruchs durchzuführen. Als Randbedingung ist von einem plötzlichen und vollständigen Bruch der Staumauer auszugehen; d.h. die Staumauer „verschwindet“ augenblicklich und die aufgestauten Wassermassen ergiessen sich als Flutwelle in den Unterlauf.

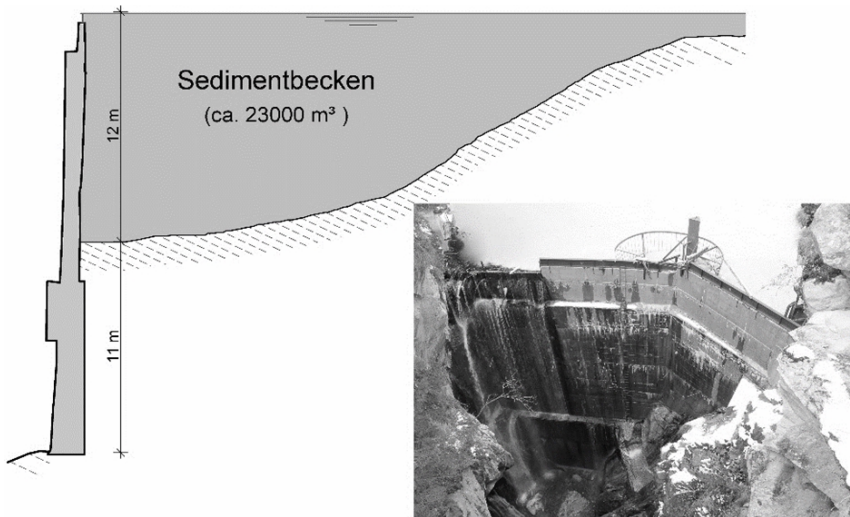


Abbildung 3: Geometrie der Staumauer und luftseitige Ansicht.

Die kantonale Baukommission verlangte im Jahr 2015 die Überprüfung dieser Staumauer. Neben der Überprüfung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit musste auch für das Szenario eines Staumauerbruchs das besondere Gefährdungspotenzial ermittelt werden. Das massgebende Gefahrenszenario ergibt sich bei einem vollständigen Bruch der Staumauer, beispielsweise bei einem Erdbeben, wenn das Sedimentbecken mit Wasser gefüllt ist. Unterhalb der Staumauer befindet sich die enge, 55 m lange untere Massaschlucht (Abb. 2), welche im Falle eines Staumauerbruchs von der Flutwelle durchflossen wird. Anschliessend folgt der Massakanal, der das Wasser in die Rhone ableitet.

2 Methoden zur Flutwellenberechnung

Der maximale Flutwellenabfluss in der unteren Massaschlucht und zu Beginn des Massakanals wurden mit einer hydraulischen Modelluntersuchung (studentische Semesterarbeit) sowie mit numerischer 1D (Beratungsmandat) und 3D Modellierung (HSR Forschungsprojekt) ermittelt. Zum Vergleich dient der Breschenabfluss, welcher mit dem vereinfachten Verfahren zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung, Verfahren CTGREF (BFE 2014) abgeschätzt wurde.

Die numerische 1D Modellierung erfolgte mit der Software HEC-RAS Version 4.0. Im Rahmen der studentischen Arbeit wurden in einem Modell im Massstab 1:50 die hydraulischen Modellversuche abgewickelt. Die numerische 3D Modellierung wurde mit der Software ANSYS CFX durch das HSR Institut für Energietechnik durchgeführt.

3 Digitale Grundlagendaten

Die für die Modellierungen notwendigen Grundlagendaten mussten zuerst im Feld erhoben werden. Hierzu wurden in der unteren Massaschlucht Positionskugeln verteilt und befestigt. Ein Faro Focus3D X 30 Laserscanner wurde an zehn verschiedenen Positionen entlang der Schlucht aufgestellt. An jeder der zehn Positionen wurde vom Laserscanner eine Aufnahme der umliegenden Strukturen erstellt. Mithilfe der Positionskugeln konnten die Aufnahmen ausgerichtet und übereinandergelegt werden. Für eine optimale Überlappung und Positionierung der verschiedenen Scans zueinander mussten mindestens zwei gleiche Positionskugeln pro Scan vom Laserscanner erkannt werden. In Abbildung 5 sind die weissen Positionskugeln und der Faro-Scanner zu sehen. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte im Programm FaroScene. So konnte aus den Aufnahmen des Laserscanners eine Punktwolke und ein Gitter erstellt werden. Zusätzlich wurden mit einer Drohne Fotos des umliegenden Geländes aufgenommen und mittels Photogrammetrie eine Punktwolke des Geländes generiert. Durch Triangulation der beiden Punktwolken wurde ein digitales Geländemodell (DOM) des Untersuchungsperimeters erstellt. Für die numerische 1D Modellierung wurden aus dem digitalen Geländemodell 28 Querprofile erzeugt. Da HEC-RAS nicht mit überhängenden Strukturen in Querprofilen rechnen kann, wurden aus den effektiven Querprofilen flächengleiche Rechteckprofile ohne Überhänge erstellt (Abb. 4), welche dann in HEC-RAS eingelesen werden konnten.

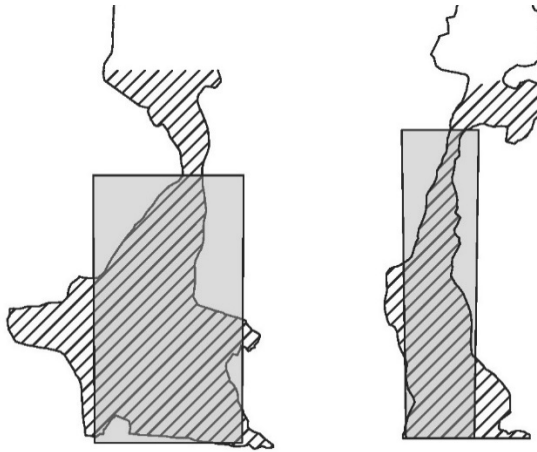


Abbildung 4: Typische Querprofile der unteren Massaschlucht. Die schraffierten Bereiche sind flächengleich zu den grauen Rechtecken. Links ist das Querprofil 20 und rechts das Querprofil 11.

Um eine numerische 3D Simulation mit ANSYS CFX durchführen zu können, wird ein Volumenmodell benötigt. Daher wurde aus dem digitalen Oberflächenmodell ein Volumenmodell erzeugt.



Abbildung 5: Massaschlucht mit Faro Focus^{3D} X 30 Laserscanner (weisses Rechteck) und weissen Positionskugeln (weisse Kreise).

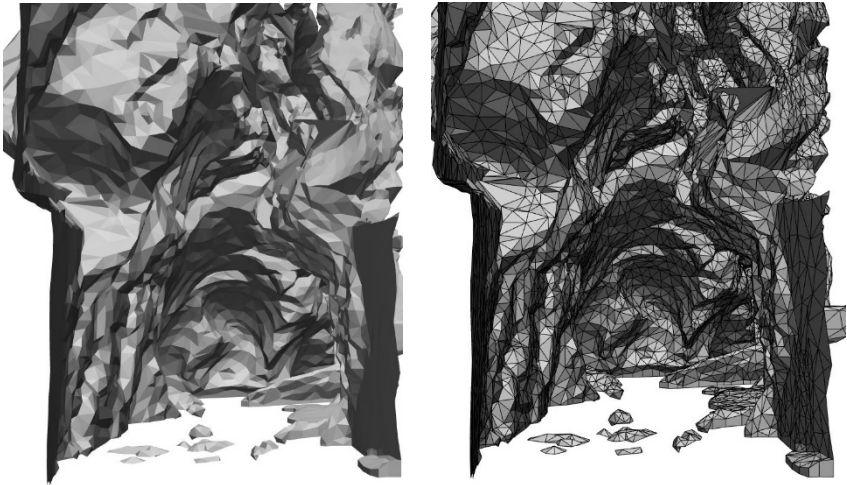


Abbildung 6: Ansicht der Massaschlucht aus Abbildung 5 als digitales Oberflächenmodell (links) und als Gitter für die numerische 3D Berechnung (rechts).

4 Ergebnisse

Aufgrund der Feldaufnahmen konnten entlang der 55 m langen unteren Massaschlucht drei markante Engstellen detektiert werden (im Bereich der Querprofile 5, 11 und 20 in Abbildung 7). Diese Engstellen führen zu einem Aufstau oberhalb der Engstellen und somit zu einer Dämpfung des Abflusses. Je nach Untersuchungsmethode resultiert ein maximaler Ausfluss bei der Staumauer (Breschenabfluss) bei einem plötzlichen und vollständigen Staumauerbruch von 545 bis 780 m³/s. Zu Beginn des Massakanals liegt der Abfluss zwischen 250 und 340 m³/s.

4.1 Verfahren CTGREF

Mit dem vereinfachten Verfahren «CTGREF» zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung (BFE 2014) beträgt der Breschenabfluss bei einem spontanen Bruch der Staumauer rund 780 m³/s. Bei diesem Verfahren wird der Einfluss der unteren Massaschlucht nicht berücksichtigt, wodurch der Abfluss zu Beginn des Massakanals immer noch bei 780 m³/s liegt.

4.2 Numerische 1D Modellierung

Als Berechnungsannahme wurde bei der numerischen 1D Modellierung der stationäre Abfluss gesucht, bei welchem sich der Übergang von Freispiegel- zu Druckabfluss in den massgebenden Querprofilen in der Schluchstrecke einstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei einer starken Verengung im oberen Teil des Querprofils (Abb. 4) annähernd ein Druckabfluss erfolgt, bei welchem bei einer Zunahme der Druckhöhe der Abfluss nur noch wenig zunimmt. Dies ist bei einem Abfluss von 200 bis 250 m³/s der Fall.

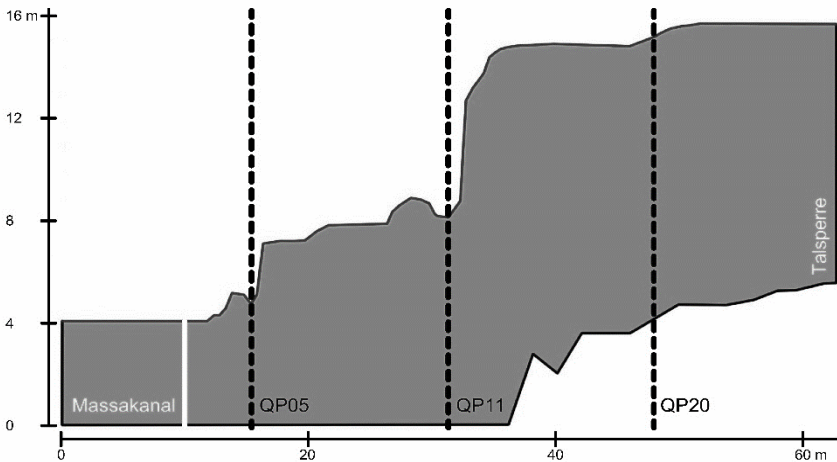


Abbildung 7: Wasserspiegelverlauf in der unteren Massaschlucht bei einem Abfluss von 200 m³/s. Engstellen im Bereich der Querprofile QP05, QP11 und QP20 führen zu lokalem Aufstau.

4.3 Hydraulische Modellversuche

Das Sedimentbecken, eine vereinfachte Stauwand in Form einer Rechteckplatte, die untere Massaschlucht und der obere Teil des Massakanals wurden in einem hydraulischen Modell im Massstab 1:50 in Froude'scher Ähnlichkeit nachgebildet. Die Schlucht wurde basierend auf dem 3D-Modell mit Dreiecksvermaschung mit 3D-Druckern erstellt. Wegen der maximal möglichen Druckgrösse wurde die Schlucht in insgesamt 104 Einzelteile eingeteilt, einzeln gedruckt und anschliessend zusammengebaut. In einem additiven Druckverfahren wurde so die gesamte Schlucht detailgetreu nachgebildet. Ein vereinfachtes Rechteckbecken bildet das Sedimentbecken und eine PVC-Rinne den Massakanal nach. Ein möglichst rasches, manuelles Ziehen der Rechteckplatte simuliert den spontanen Bruch der Stauwand. Der Verlauf der Wasserspiegellagen (Abflusstiefen) im Sedimentbe-

cken und im Massakanal wurde im Modell mit Echoloten kontinuierlich erfasst. Mit Messflügeln wurde die Fließgeschwindigkeit im Sedimentbecken und im Massakanal gemessen. Mit den Abflusstiefen und den Fließgeschwindigkeiten konnte der Abfluss zeitabhängig berechnet werden. Videoaufnahmen dokumentieren die Versuche.

4.4 Numerische 3D Modellierung

Die Simulation der Flutwelle wurde als instationäre (transiente) Strömung durchgeführt. Ziel dieser Simulationen war die zeitabhängige Ermittlung des Abflusses am Standort der Staumauer und im Massakanal sowie die Visualisierung der Abflussverhältnisse im ganzen Untersuchungsperimeter.

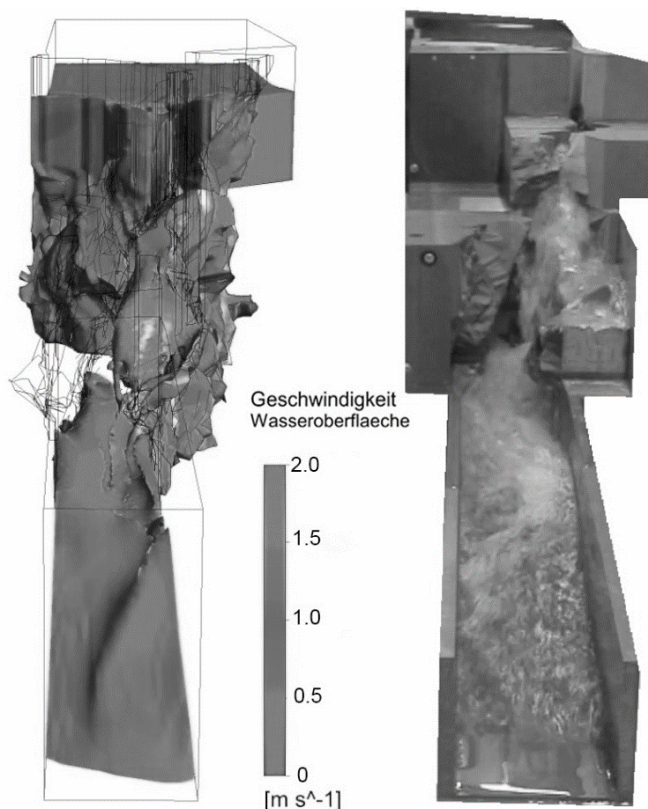


Abbildung 8: Blick gegen die Fließrichtung. Abflussverhältnisse beim Ausgang der unteren Massaschlucht und am Anfang des Massakanals.

Abbildung 8 zeigt beispielsweise die Fließgeschwindigkeit [m/s] an der Wasseroberfläche als Modellwert. Der Umrechnungsfaktor für die Fließgeschwindigkeit von Modell- auf Prototypwerte beträgt 7.1. Die maximale Fließgeschwindigkeit im Massakanal liegt somit bei rund 14 m/s.

4.5 Vergleich der verschiedenen Methoden

Tabelle 1 zeigt die ermittelten Abflusswerte für die verwendeten Methoden. Beim zeitlichen Aufwand ist die Beschaffung der Grundlagendaten nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Ermittelte Abflüsse mit Q_{vor} als maximaler Breschenabfluss und Q_{nach} als Abfluss im Massakanals.

Methode	Randbedingung	Q_{vor} [m ³ /s]	Q_{nach} [m ³ /s]	Zeitlicher Aufwand
CTGREF	Handrechnung	780	780	2 Stunden
Num. 1D	stationär	-	250	2 Arbeitstage
Num. 3D	instationär	660	275	2-3 Wochen
Hydraulische Modelluntersuchung	stationär und instationär	545	340	1'200 Stunden Drucken 5 Arbeitstage Zusammenbau und Versuche

Der Vergleich der Videofilme aus der hydraulischen Modelluntersuchung mit den 3D Visualisierungen zeigen eine frappante Übereinstimmung bei den Abflussverhältnissen. Beispielsweise schlägt die Flutwelle im Bereich des QP20 auf die Engstelle und wird in das Sedimentbecken reflektiert und schaukelt dann hin und her bis das Becken entleert ist. Die Entleerungszeit beträgt sowohl im hydraulischen Modellversuch wie in der numerischen 3D Modellierung ca. 10 s (Modellwert). Die Stosswelle, welche sich quer durch den Massakanal bildet, ist im hydraulischen Modell wie auch in der numerischen 3D Modellierung gut zu erkennen (Abb. 8).

5 Schlussfolgerung und Empfehlung

Alle drei Methoden zeigen eine deutliche Dämpfung des maximalen Flutwellenabflusses durch die untere Massaschlucht. Am zuverlässigsten werden die ermittelten Abflüsse mit ANSYS CFX beurteilt. Obwohl das Ergebnis aus der numerischen 1D Modellierung relativ nah am Ergebnis der numerischen 3D Modellierung ist, wird von der Anwendung der numerischen 1D

Modellierung bei solch komplexen Geometrien mit überhängenden Strukturen abgeraten, da starke Vereinfachungen in den Querprofilen und in den Berechnungen getroffen werden mussten. Die Bestimmung der zeitabhängigen Abflusswerte aus dem hydraulischen Modell werden als eher ungenau eingestuft. Der Messflügel weist eine gewisse Trägheit auf und stört bei den hohen Geschwindigkeiten im Massakanal die Strömung stark. Die Handrechnung zeigt den grössten Abfluss und eine Berücksichtigung der Massaschlucht ist nicht möglich.

Aufgrund der durchgeführten Modellierungen konnte gezeigt werden, dass der maximale Flutwellenabfluss unterstrom der unteren Massaschlucht schadlos im Massakanal abgeführt werden kann. Eine besondere Gefährdung im Sinne der Richtlinie für die Sicherheit der Stauanlagen ist damit nicht gegeben. Aufgrund dieser Untersuchung wurde zum ersten Mal in der Schweiz eine Talsperre von der Aufsicht des Bundes enthoben und der Aufsicht des Kantons Wallis unterstellt.

6 Literatur

- BFE (2014): Vereinfachtes Verfahren («CTGREF») zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung, Bern 2014.
BFE (2015): Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen, Teil A: Allgemeines, Bern 2015
BWG (2002): Sicherheit der Stauanlagen, Richtlinien des BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie), Biel, 2002

Autoren:

Andrea-Kristin Bachmann
Prof. Dr. Jürg Speerli

Walter Clausen

Institut für Bau und Umwelt
HSR Hochschule für Technik
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil
Schweiz

VWI Ingenieure AG
Kiesweg 2
3904 Naters
Schweiz

Tel.: +41 55 222 49 92
E-Mail: abachman@hsr.ch
jspeerli@hsr.ch

Tel.: +41 27 922 09 84
E-Mail: walter.clausen@vwi.ch

Hydro-numerische Simulationen vs. Einschätzung – Instrumente zur Ge- fahrenbeurteilung in Wildbächen

Markus Moser, Susanne Mehlhorn, Stefan Janu,
Gerald Jäger, Johannes Kammerlander

Die Arbeit in der Gefahrenbeurteilung und Ausweisung der Gefahrenzonen von Naturgefahren erfolgt in enger Kommunikation mit der Bevölkerung. Eine einheitliche, objektive sowie reproduzierbare Beurteilung ist in diesem Zusammenhang ein wichtiges Ziel. Die historische Methode, empirisch hergeleitete Kennwerte sowie Expertenwissen sind dabei entscheidende Eingangsgrößen mit einer mehr oder weniger subjektiven Bewertung. Die Fortschritte der letzten Jahre in der praktischen Anwendung von numerischen Modellen ergänzen die Beurteilung um eine zusätzliche Methode. Simulationen stellen daher mittlerweile ein wertvolles Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung dar. Durch benutzerfreundliche Oberflächen werden dem Anwender die Bedienung und Berechnung unterschiedlicher Szenarien erleichtert. In den Modellen sind aber empirisch hergeleitete Kennwerte bzw. Formelsätze implementiert, die aufgrund der Komplexität der zu berechnenden Prozesse jedoch meistens vereinfachten Verfahren abgeleitet werden. Dies führt dazu, dass jedes Modell viele Möglichkeiten, aber auch Grenzen der Anwendbarkeit mit sich bringt. Die Einschätzung bzw. Gewichtung der berechneten Ergebnisse durch den Anwender ist ein wichtiger Teil und wird als Ergebnisinterpretation bezeichnet.

Gefahrenbeurteilung, Hydro-numerische Simulationen, Steckbrief Qualitätssicherung, Berechnung vs. Einschätzung

1 Einleitung

In der Gefahrenzonenplanung kann man auf eine Vielzahl von Hilfsmitteln hinsichtlich Grundlagendaten und Programmen zur Aufbereitung sowie zur

Berechnung zurückgreifen. Die rasante Entwicklung in der elektronischen Datenverarbeitung führt aber dazu, dass Anwenderinnen und Anwender schnell den Überblick verlieren, welche Berechnungsmethoden und Modelle für gewisse Fragestellungen interessant sind. Besonders im Wildbachbereich hat man vorwiegend mit Fließprozessen zu tun, die nur schwer durch Modelle vollständig beschrieben werden können. Trotzdem versucht man in der Forschung und Entwicklung diese komplexen Prozesse nachzubilden und eine Verbesserung in der Berechnung von Naturgefahrenprozessen zu erzielen. Den Auftrag zur Umsetzung jener Maßnahmen, die dem Stand des Wissens und Technik entsprechen, hat man in der Gefahrenzonenplanverordnung 1976 §8. (1,2) festgeschrieben.

2 Historische Entwicklung

In Österreich bedient man sich in der Praxis im Zuge der Gefahrenzonenplanerstellung meist aus Dokumentationen historischer oder aktueller Ereignisse (Ereigniskataster, der Historische Methode, Stumme Zeugen, persönlichen Erfahrungen, Gemeinde-Kirchenchroniken), der Festlegung möglicher Prozesse (Information aus Begehungen im Naturraum, Prozessanalyse) und Bemessungswerten (Szenarien), die mit einer 150-jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben werden. Aufgrund der zahlreichen Ereignisse der letzten Jahrzehnte konnten sehr viele Daten gesammelt werden.

Die systematische Aufarbeitung im Ereigniskataster und eine intensive, standardisierte Ereignisdokumentation und -analyse förderten auch die Entwicklung zahlreicher neuer Berechnungsmethoden von einfachen profilweisen Ansätzen bis zu aufwändigen numerischen 1d-, 2d- oder 3d-Modellen. Mit der Anwendung dieser „neuen“ Modelle entwickelte sich ein zusätzliches - dem Stand der Technik entsprechendes - Hilfsmittel für die Gefahrenzonenplanung (Moser und Janu, 2008). Versuche, gänzlich alle Prozesse in Modellen abzubilden, sind auch unter Einbeziehung von verschiedenen Szenarien bis dato mit den entwickelten Modellen nicht möglich. Möglich und durchaus sinnvoll ist die Berechnung von bestimmten – durch Modelle „berechenbaren“ – Fließvorgängen und Transportprozessen, um eine weitere Aussage/Ergebnis für die Abgrenzung der Gefährdungsbe-
reiche zu bekommen (Abb.1).

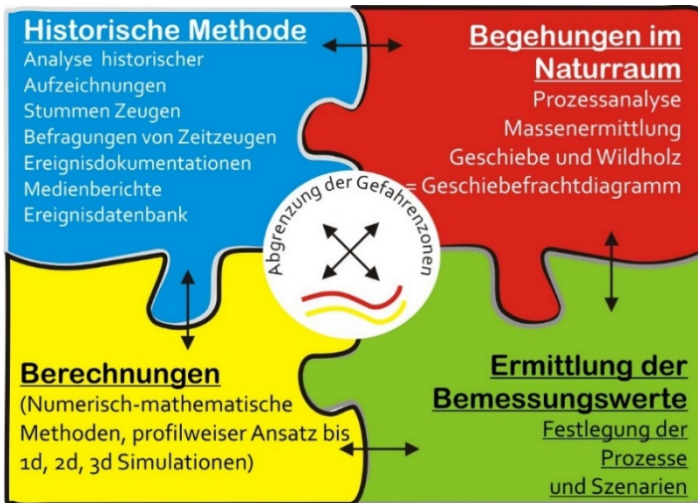


Abbildung 1: Methoden der Gefahrenbeurteilung in Wildbächen

3 Berechnungsmethoden und Modelle

Je nach Wildbachprozess hat man für die verschiedenen Verlagerungsprozesse gewisse Anforderungen an die Berechnungsmethoden und Modelle. Ein Blick in die Liste der gängigen Modelle macht deutlich, dass es für den Prozesstyp „Reinwasserabfluss“ deutlich mehr numerische Modelle gibt, als für Prozesse mit hohem Feststoffanteil. Feststoffreiche Wildbachprozesse sind nach wie vor ein Spezialfall und die Berechnungsmethoden sind weniger weit fortgeschritten wie in der Reinwasserhydraulik. Neben den grundsätzlichen Berechnungsmöglichkeiten für verschiedene Wildbachprozesse sind auch die sog. „Randbedingungen“ meistens schwierig zu bestimmen.

Je nach Fragestellung ergibt sich auch die Auswahl des Modells. Die Auswahl erfolgt nach dem charakteristischen Verlagerungsprozess nach ONR 24800 (meist Leitprozess) in Kombination mit relevanten Parametern, wie z.B.: Sohlneigung, Vorlandabfluss ja/nein, Verklausung ja/nein und führt zu einer groben Einschätzung, welches Modell grundsätzlich geeignet ist oder nicht. Zum anderen, wie zum Beispiel, maximale Geschiebetransportkapazität in verbauten Wildbachgerinnen für Projektierungen oder Berechnung von Überflutungsflächen für Gefahrenausweisungen.

Oftmals ist aufgrund der Gegebenheiten und/oder der Fragestellung auch eine Kombination mehrerer Modelle sinnvoll. Zum Beispiel kann eine Detailberechnung eines Querbauwerks oder einer Gerinnestrecke mit einem 1d-Modell und die Simulation von Überflutungsflächen im Vorland für bestimmte Szenarien (Brückverklausungen, kritische Gerinnestellen) mit einem 2d-Modell durchgeführt werden.

4 Wann ist eine Simulation (numerisch-mathematische Methode) hilfreich und wenn ja – Was muss ich wissen?

Für die Abgrenzung von Wildbachgefahrenzonen gibt es lt. „Richtlinie Gefahrenzonenplanung“ zahlreiche anwendbare Methoden. Es liegt an dem/der Planverfasser/in mit welchen Methoden eine schlüssige Aussage getroffen werden kann. Wichtig ist jedenfalls die Anwendung mehrerer Methoden, obgleich ihre Ergebnisse in Abhängigkeit der naturräumlichen Gegebenheiten unterschiedlich stark gewichtet werden können.

Je nach Ausgangslage und naturräumlichen Gegebenheiten hat die numerisch-mathematische Methode (Anwendung von Simulationsmodellen) einen höheren oder geringeren Mehrwert gegenüber den anderen Methoden. Vorausgesetzt die Ergebnisse wurden plausibilisiert und die berechneten Prozesseinwirkungen anhand von Chronikdaten oder Stummen Zeugen mit den bisher Beobachteten gegenübergestellt, können Simulationen einen hohen Mehrwert für nachfolgende Fragestellungen haben:

- ◁ Überflutungsgebiet in Vorländern mit schwach ausgeprägten Fließwegen: Talbäche über flache, breite Schwemmkegel bis zum Vorfluter
- ◁ Verklausungen von Brücken mit Abflüssen ins Vorland (möglicherweise dicht bebaut und daher auch anthropogen stark überprägt), Abflussrelevante Einfriedungen
- ◁ Auswirkung von verschiedenen Szenarien, die durch die historischen Ereignisse nicht abgebildet wurden (z.B.: links- und rechtsufrige Bachverwerfungen am Schwemmkegel)
- ◁ Geschiebetransportvermögen anhand der Bemessungsganglinie (Geschiebefracht), Geschiebeanlandungen in Unterlaufgerinnen
- ◁ Fließgeschwindigkeiten und Abflusstiefen je Knoten und Zeitschritt im Simulationsbereich für unterschiedliche Szenarien und Prozess-typen (Reinwasser bis Murgang lt. Verlagerungsprozesse)

Die Entscheidung welches Simulationsmodell die auszugsweise genannten Fragestellungen abbilden kann, ist dann von dem/der Planverfasser/in zu treffen. Sehr entscheidend dabei ist auch die sog. Ausgangslage. Welche Datengrundlagen stehen zur Verfügung? Fragen wie das hydrologische Belastungsbild und dessen Auswirkung auf den Wildbachprozess sind ebenso zu beantworten, wie sämtliche zur Prozessbeurteilung maßgebenden Eingangsgrößen. Sind diese dann geklärt oder ermittelt, sind noch zusätzliche Randbedingungen wie z.B.: Geländemorphologie, Stumme Zeugen und Fließwege zur Definition der „Visitenkarte“ eines Einzugsgebietes bzw. „Raumrelevanten Bereichs“ notwendig.

Für die Simulation von Reinwasserabflüssen stehen sehr viele Modelle zur Verfügung. Wichtige Eingangsgrößen sind:

- ◀ die Abflussganglinie (oder der Scheitelwert), sowie
- ◀ Daten zu Fließrauigkeiten und -geschwindigkeiten

In flachen Wildbächen stehen viele Tabellenwerke zur Verfügung, die Fließrauigkeiten in steilen, glatten Künetten sind aber bereits schwieriger festzulegen. Hierfür werden vom Fachzentrum Wildbachprozesse der Wildbach- und Lawinenverbauung regelmäßig Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt und die entsprechenden Fließrauigkeiten rückgerechnet (Moser et al., 2018). Zusätzliche Daten sind zur Plausibilisierung oder sogar Validierung und Kalibrierung der Eingangsdaten oder Ergebnisse notwendig (z.B.: Ereignisdokumentationen, Pegeldata).

Bei Prozessen mit fluvialem bzw. murartigem Feststofftransport sind dann die Eingangsgrößen sehr schwierig zu bestimmen. Beispiele dazu sind etwa:

- ◀ Wieviel Geschiebeanteil muss angesetzt werden (% Reinwasser – transportierbare Menge realistisch?)
- ◀ Welche Korngrößen sind maßgebend?
- ◀ Sind Rückstaueffekte durch den Vorfluter möglich und werden diese im Modell berücksichtigt?

Noch viel aufwändiger bis fast unmöglich sind Berechnungen von Murgängen. Der sehr komplexe Prozess ist keinesfalls umfassend zu modellieren, zahlreiche Vereinfachungen sind in den Modellen enthalten. Aus dieser Ausgangslage wird klar, dass nur bestimmte Teile eines Murgangs numerisch nachgebildet werden können. Entsprechend dieser Rahmenbedingungen sind auch die Ergebnisse zu werten und zu interpretieren.

5 Modellergebnis – Was steckt dahinter?

Die Aussage, dass das Modellergebnis so gut wie die Eingangsdaten ist, stimmt zwar grundsätzlich, man sollte diese Aussage aber noch um die Beurteilung (Ergebnisinterpretation) erweitern. Auch in diesem Fall sind Erfahrungen mit Simulationsprogrammen und die entsprechende Gebietskenntnis zur umfassenden Beurteilung eines Ergebnisses sehr wichtig. Die Interpretation eines Berechnungsergebnisses unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Modellannahmen, Szenarien und der planlichen Darstellungsmöglichkeiten sind auch mit Expertenwissen oftmals ein schwieriges Unterfangen. Fragen wie:

Welche Geländedaten wurden verwendet?

Wie grob ist die Auflösung des Modells?

Sind Kunstbauten integriert worden?

Wo befindet sich der Zulauf, wo der Auslauf?

Wie groß ist das Modellgebiet?

sind Standardfragen am Beginn einer Interpretation. Hinzu kommen dann noch verschiedene Szenarien, die aufgrund der Bachcharakteristik und der einzelnen Wildbachprozesse als Ergebnis zu bewerten sind.

6 Steckbrief zur Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung wird ein „Steckbrief“ empfohlen. Zu jeder planlichen Darstellung von Simulationsergebnissen (z.B. Überflutungsflächen) sollte dieses Datenblatt beigelegt werden, da es die oben genannten Infos zu den Simulationsgrundlagen enthält. Die eingangs beschriebene, objektive sowie reproduzierbare Beurteilung wird durch diese Vorgehensweise erfüllt. Grundsätzlich sind Angaben zum verwendeten Modell inkl. dessen Berechnungsansatz und der Verfügbarkeit (Link zum Entwickler), zu den Eingangsdaten, wie z.B. Geländedaten, Modelldaten, Kunstbauten, Widerstände (Fließrauigkeiten), Zuflussmengen und -ort sowie auch zu den Ausflussbereichen und sonstigen Wildbachprozessen (Geschiebe berücksichtigt ja/nein, Erosion berücksichtigt ja/nein) zu machen. Wichtig im Steckbrief ist das am Plan dargestellte Szenario (sh. Tabelle1: Steckbrief am Beispiel HEC-RAS 5.0.6).

Tabelle 1: Steckbrief einer Simulation am Beispiel HEC-RAS 5.0.6

Steckbrief Simulation – Piberbach			
Verwendetes Modell - HEC-RAS 5.0.6 - Hersteller: US Army Corps of Engineers, www.hec.usace.army.mil			
Numerische Berechnung: 1D Finite Differenzen Methode mit dynamischer Welle (instationär); 2D Finite Volumen Methode;			
Räumliche Diskretisierung: 1D, unstrukturierte Querprofile; 2D, unstrukturierte und strukturierte Gitter. Die unstrukturierten Gitter sind auf 8 Kanten limitiert;			
Zeitliche Diskretisierung: explizites Verfahren mit vorgegebenem Zeitschritt			
Simulationsgrundlagen:			
<u>Geländedaten:</u>			
z.B.: Laserdaten (Auflösung: 0,5x0,5 m ² , Flugjahr: 2012-2013); <i>Terrestrische Vermessung des Unterlaufgerinnes - Querprofildaten verwendet; Civil3D-Modell der Planung</i>			
<u>Modelldaten:</u>			
Fläche des Modellgebiets: 1,0 km ² ; Zellengröße (GRID): xm; Anzahl an Berechnungselementen: xx			
Kunstabauten:	Ja	Nein	Tw.
Gerinne ins Modell eingebaut:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brücken berücksichtigt:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brücken verklaust?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Durchlässe berücksichtigt:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Durchlässe verlegt?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abflussundurchlässige Bauten (Häuser,...) berücksichtigt:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abflussrelevante Einfriedungen (Gartenmauern,...) berücksichtigt:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Häuser im DHM integriert</i>			
<u>Fließbedingungen:</u>			
Umgrenzung aus Landnutzung und gutachterlich via Orthofoto digitalisiert; Vorland: aus DKM-Landnutzung und Orthofotos digitalisiert; Gerinne: gutachterlich auf Basis von direkten Abflussmessungen			
<u>Zufluss Wasser:</u>			
Instationäre Berechnung: Ganglinie berechnet mit N/A Modell (vereinfachtes SCS-Verfahren); Ort der Abflusszugabe: am oberen Modellrand im Gerinnehektometer 2,5 lt. WLK; Vorfluter: berücksichtigt			
<u>Ausfluss Wasser:</u>			
Unterer Modellrand (bei Ortseingang Radstadt) mit konst. Energieliniengefälle			
<u>Zufluss Geschiebe/Feststoffe:</u> Kein Geschiebe berücksichtigt			
Berechnete Szenarien: Variante 1: BE; Variante 2: BE mit Teilverklausung der Brücke hm 1,2			
Planlich dargestellte Variante 1			
Spitzenabfluss 17 m ³ /s (=HQ ₁₅₀) und Wasserfracht 127.000 m ³ ; Dargestellte Berechnungsergebnisse:			
Maximale Fließtiefen gesamte Simulation (mit Orthofoto im Hintergrund); Plausibilitätsprüfung: ja			
Ergebnisse: jpg, shapes, in digitaler Form vorhanden und unter: xxx/Exchange/Conny			

7 Empfehlungen für die Praxis

Unterschiedliche Modelle werden in der Praxis als Grundlage für die Erstellung von Gefahrenzonenplänen bereits angewendet und bringen einen entscheidenden Mehrwert in der Abgrenzung der Gefahrenzonen für Wildbäche. Einige Empfehlungen für die praktische Anwendung sollen im Folgenden zusammenfassend angeführt werden:

Vom einfachen Ansatz zu komplizierten, aufwändigen Modellen

Ausgehend von der Fragestellung „Was will ich simulieren?“ ist ein guter Zugang die Berechnungen mit einfachen Ansätzen, wie profilweise ingenieurmäßige Berechnungen oder 1d-Simulationen durchzuführen. Nicht selten werden damit schon sehr gute Ergebnisse erreicht und auf eine aufwändige 2d-Simulation kann verzichtet werden. Die einfachen Berechnungen liefern auch bei einer Notwendigkeit einer 2d-Berechnung wichtige Inputs für das Modell. Kenngrößen, wie kritische Abschnitte (Verengungen, Verklausungen) mit möglichen Gerinneüberbordungen und daraus resultierender Abfluss ins Vorland können werden aufgezeigt und das 2d-Modell dann hinsichtlich Modellausschnitt optimiert werden. Für diesen Ausschnitt kann man dann auch gezielt genauere Datengrundlagen ins Modell einbauen, sodass die Qualität des Ergebnisses verbessert werden kann.

Vom GROBEN ins FEINE

Mehrere Simulationsmodelle beginnend mit zunächst grober räumlicher Diskretisierung (große Auflösung der Zellen) zeigt mögliche Fließwege und die Ausdehnung an. Im feineren Modell kann dann der Simulationsbereich gut eingegrenzt und das Modell im Detail auch für die wichtigen Abschnitte/Flächen erstellt werden. Hinsichtlich Netzstruktur haben sich für Feststofftransportberechnungen die Dreiecksnetze als günstiger gegenüber Rechtecksnetzen herauskristallisiert.

Bandbreiten rechnen

Die zu berechnenden Prozesse sind mit Ausnahme vom Reinwasserabfluss mit großen Unsicherheiten - aufgrund der vereinfachten Berechnungsansätze - behaftet. Aus diesem Grund sind verschiedene Modellvariationen (Parameter, Formelansätze) zu rechnen, um die Bandbreite möglicher Ergebnisse zu bekommen. Letztlich bleibt es dem Planverfasser als Experte überlassen, diese Ergebnisse zu „Werten“ und in die Beurteilung einfließen zu lassen.

Varianten mit und ohne Kunstbauten

Kunstbauten (Brücken, Dämme, Einfriedungen) bewirken eine starke Änderung der Fließwege, Ablagerungen und Erosionen. Zur Ermittlung der Änderungen und Auswirkungen sind immer Berechnungen mit und ohne Kunstbauten empfehlenswert. Auch die Angabe, ob verschiedene Varianten berechenbar sind oder nicht, sollte unbedingt im Qualitätsdatenblatt einfließen (z.B.: Rückstau durch Vorfluter oder See möglich: ja/nein).

Modellplausibilisierung

Geländemodellgrundlagen durch Ortsaugenschein plausibilisieren – besonders bei (neuen) Gebäuden, Mauern, Geländeänderungen (Aufschüttungen, Straßenneu oder –umbau)

Ergebnisplausibilisierung/ Ergebnisdarstellung

Qualitätsverbesserung durch Steckbrief mit den Datengrundlagen der Simulationsvariante sowie des Modells. Stichprobenweise Kontrolle berechneter Fließgeschwindigkeiten und –höhen. Bei 2d-Modellen sollten auch einfache 1d-Berechnungen an neuralgischen Punkten zur Kontrolle und Plausibilisierung durchgeführt werden.

Layout: Legende ab 5 cm Fließtiefen darstellen; Fließtiefen und –geschwindigkeiten planlich je Variante und Zeitschritt darstellen, Fließwege durch Fließvektoren oder Stromlinien zeigen Anströmrichtung und Dauer sowie starke Sohlschubspannungen an, Film/Animationen von Teilbereichen für die Gefahrenzonenplan-Koordinierungen sowie Öffentlichkeitsarbeit erstellen

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Fortschritte der letzten Jahre in der praktischen Anwendung von numerischen Modellen ergänzen die Beurteilung gestützt auf die historische Methode, empirisch hergeleitete Kennwerte sowie Expertenwissen um eine zusätzliche objektive Methode. Simulationen stellen daher mittlerweile ein wertvolles Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung dar. Auch wenn aufgrund immer benutzerfreundlicher Oberflächen die Bedienung der Modelle einen großen Fortschritt gemacht hat, sollten die einfachen Ansätze wie profilweiser ingenieurmäßiger Ansatz oder 1d-Berechnungen grundsätzlich zur ersten Abschätzung herangezogen werden. Die einfachen Berechnungen liefern wichtige Inputs, Kenngrößen wie kritische Abschnitte (Verengungen, Verklausungen) mit möglichen Gerinneüberbordungen und in weiterer Folge der Abfluss ins Vorland werden aufgezeigt. Auch das Abfuhrvermögen eines Gerinnes nach Verbauung kann mittels einfachem 1d-Modell wesentlich einfacher und fachlich gleichwertig berechnet und dargestellt werden. Sobald jedoch Gerinneüberbordungen auftreten, ist eine Berechnung der Ausbreitung der Fließwege entweder aus einer Kombination von 1d- und 2d-Modellen (HEC-RAS 5.0.6) oder reinen 2d-Modellen (FLO-2D, HYDRO_AS-2D, BASEMENT) möglich. Aufgrund der großen Unsicherheiten der Berechnung von Prozessen mit Feststofftransport oder Murgängen sind hier verschiedene Modellvariationen (Parameter, Formelan-

sätze) zu rechnen, um eine entsprechende Bandbreite zu bekommen. Letztlich bleibt es den Expertinnen und Experten überlassen, diese Ergebnisse zu „werten“ und in die Beurteilung einfließen zu lassen. Der hier vorgestellte Steckbrief zur Qualitätssicherung leistet einen Beitrag zur eingangs beschriebenen, objektiven sowie reproduzierbaren Beurteilung von berechneten Werten.

9 Literatur

- ON-institut (Hrsg.) 24800 (2009): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung
Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung
- Jäger, G.; Moser, M.; Habersack, H. (2012): Methoden und Modelle zur
Berechnung von Abflusskapazitäten und Geschiebetransport in alpinen
Fließgewässern, Wildbach- und Lawinenverbau; Zeitschrift für Wildbach-,
Lawinen, Erosions- und Steinschlagschutz, Heft Nr. 169
- Moser, M.; Kammerlander, J.; Tritthart, M.; Janu, St.; Burger, H. (2018):
Abflussmessungen in Wildbachgerinnen mit FlowSens – Fließge-
schwindigkeiten und abgeleitete Fließrauigkeiten, Wildbach- und
Lawinenverbau; Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen, Erosions- und
Steinschlagschutz, Heft Nr. 180

Autoren:

DI Markus Moser
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Lungau
Johann Löcker Str. 3, 5580 Tamsweg
markus.moser@die-wildbach.at

DI Gerald Jäger
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Bregenz
Rheinstraße 32/4, 6900 Bregenz
gerald.jaeger@die-wildbach.at

DI Stefan Janu
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Steiermark Nord
Schönaustraße 50, 8940 Liezen
stefan.janu@die-wildbach.at

Dipl.Geogr. Susanne Mehlhorn
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Sektion Wien, NÖ und Bgld.
Marxergasse 2, 1030 Wien
susanne.mehlhorn@die-wildbach.at

DI Dr. Johannes Kammerlander
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Außerfern
Buchenort 2a, 6600 Lechaschau
johannes.kammerlander@die-wildbach.at

Komplexbaustelle Hochwasserrückhaltebecken Wippra

Lars Schaarschmidt
Andreas Rudolf
Sigrid Schulmann

Nach mehr als 15 Jahren Projektlaufzeit wird ein neues Hochwasserrückhaltebecken 21 Orte an der Wipper vor Überflutung schützen. Das ökologisch durchgängige 17 m hohe Bauwerk kann bis zu 4,25 Millionen Kubikmeter Wasser zurückhalten. Das Becken ist ein wesentlicher Baustein zur Umsetzung des Hochwasserschutzkonzeptes Wipper und wird durch den Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt errichtet. Der Beitrag stellt Einzelschwerpunkte der komplexen Planungs-, Bau- und Betriebsverfahren zur Errichtung des Hochwasserrückhaltebeckens und die dabei notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit vor.

Stichworte: Hochwasserschutz, Hochwasserrückhaltebecken, ökologisch Durchgängigkeit, Seitenentnahme

1 Einleitung

Viele Ortschaften entlang der Wipper leiden unter Hochwasserereignissen. Die Schäden der letzten 30 Jahre ergeben einen zweistelligen Millionenbetrag. Ein neues Rückhaltebecken als Trockenbecken, das für Fische und andere Lebewesen passierbar ist, wird Abhilfe schaffen.

Das Projekt ist ein Baustein der Hochwasserschutz-Konzeption für die Wipper, die ein Einzugsgebiet von 621 km² Fläche bis zur Mündung in die Saale oberhalb von Bernburg umfasst.

Am Oberlauf der Wipper, direkt oberhalb der Ortschaft Wippra im Landkreis Mansfeld-Südharz, entsteht das gesteuerte Hochwasserrückhaltebecken (HRB) mit einem ökologisch durchgängigen Durchlassbauwerk. Das Stützkörpermaterial stammt aus einem neu erschlossenen, nahen Steinbruch im Tal der Wipper.

2 Planungsphase

Die Vor-, Entwurfs- und Genehmigungsplanung wurde in den Jahren 2003 – 2006 durch die Ingenieurgemeinschaft Prof. Hartung + Partner - H.P. Gauff Ingenieure erstellt. Bereits in dieser Planungsphase arbeiteten Bautechnik und Naturschutz interdisziplinär zusammen. Die Fachgebiete Geodäsie, Geotechnik/Geologie, Hydrogeologie sowie Hydrologie/Hydraulik wurden ebenfalls in die Planung integriert.

Der Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt (TSB) als Vorhabensträger beantragte 2006 die Planfeststellung für das HRB. Im wasserrechtlichen Planfeststellungsverfahren gingen nach öffentlicher Auslegung der Planunterlagen eine Vielzahl von Stellungnahmen ein. Durch die anerkannten Naturschutzvereinigungen wurde das Vorhaben abgelehnt. Ergänzende, insbesondere naturschutzfachliche Planfeststellungsunterlagen wurden 2011 eingereicht und erneut ein Beteiligungsverfahren durchgeführt, so dass der Planfeststellungsbeschluss für das HRB erst 12/2013 erging.

Im Jahr 2013 beauftragte der TSB die Tractebel Hydroprojekt GmbH (THP) mit der Generalplanung zum Neubau des HRB Wippra ab der Ausführungsplanung. THP optimierte den vorliegenden Entwurf und erstellte die Ausführungs- und Ausschreibungsplanung für vier Einzellose. Modellversuche an der Technischen Hochschule Nürnberg bestätigten die hydraulische Funktion der Lösung, die das Planungsteam für das komplexe Durchlassbauwerk empfahl (s. dazu *Carstensen et al., 2014*).

Im Rahmen der weiterführenden Planung zum HRB waren mehr als 15 Fachgebiete eingebunden. Die Wasserbauplaner wurden durch Experten für Hydraulik, Stahlwasserbau, Bauwerksüberwachung und Massivbau unterstützt. Die Tragwerksplaner erstellten auf Grundlage der Objektplanung ein 3D-FE-Modell des statisch komplexen Durchlassbauwerkes mit dem Programmsystem Sofistik und führten daran die Bemessung der Stahlbetonquerschnitte durch. Erdstatische Nachweise wurden durch das Fachgebiet Geotechnik/Geologie mit Hilfe des GGU-Softwarepakets geführt. Fachingenieure der Elektro-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik erstellten die Planungen für die technischen Ausrüstung zur Steuerung des Beckens (Los 3). Für Kompensationsmaßnahmen (Los 4) und die Holzung des Baufeldes sowie Artenschutzmaßnahmen (Los 2) waren Landschaftsarchitekten und Biologen eingebunden. Das Fachgebiet Ausschreibung/Bauwirtschaft gab die Rahmenbedingungen für die zu erstellenden Vergabeunterlagen vor. Für die Bauausführung wurden neben der Leistungsbeschreibung für wesentliche Arbeits-

schritte der Bauausführung Qualitätssicherungspläne erarbeitet (QSP Dammbau, Massivbau, Bauvermessung und Bauwerksüberwachung), um die erforderliche Qualität abzusichern. SiGe-Plan, HWS-Maßnahmeplan und Havariedokument komplettierten die Vergabeunterlagen für das Hauptbaulos (Los 1).

3 Bauphase

3.1 Baustelle Absperrbauwerk

Verschiedene vorbereitende Maßnahmen gingen dem Baubeginn voraus, darunter der Ersatzneubau der Wipperbrücke in der Eckhardtstraße, der Abbruch des alten Wasserwerkes Wippa, Holzungsarbeiten, Gehölzpflanzungen und Artenschutzmaßnahmen. Zu den ab 2014 realisierten Maßnahmen zählen auch die Aufforstung von 5,3 ha Wald bei Harzgerode, die Renaturierung eines Tyraaltarmes und die Herstellung naturnaher Gewässerabschnitte an Wipper und Thyra.

Die Hauptarbeiten begannen nach europaweiter Ausschreibung im Juni 2014 und werden bis Mitte 2020 dauern. Der feierliche Baubeginn mit Grundsteinlegung fand im Beisein des damaligen Umweltministers von Sachsen-Anhalt Hermann Onko Aeikens in 09/2014 statt.

Das neue Absperrbauwerk besteht aus einem Damm mit Durchlassbauwerk, in dem die Betriebsauslässe und die Hochwasserentlastung integriert sind (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: Baustelle Absperrbauwerk, Bautenstand 05/2019

Die Dammkrone liegt 17 m über der Talsohle und ist 190 m lang, der Dammfuß misst 120 m Breite. Der Steinschüttdamm mit geneigter Oberflächendichtung besteht aus 150.000 m³ Dammbaumaterial.

Das Durchlassbauwerk ist eine massive Stahlbetonkonstruktion. Rund 8.000 m³ Beton und Stahlbeton sowie 1.600 t Bewehrungsstahl wurden hier verbaut. Die Gründung erfolgt auf einer 1,25 m dicken Fundamentplatte.

Das HRB verfügt über einen Öko-Durchlass und zwei Betriebsauslässe (BA 1 und BA 2), die im Mittelbauteil in der Stauwand angeordnet sind. Die BA mit jeweils 1,80 m x 1,80 m lichter Durchflussöffnung sind auf den Randbermen angeordnet und mit Rollschützen ausgerüstet. In der 2,50 m breiten und 2 m hohen Mittelöffnung im Sohlbereich erfolgt die Gewässerdurchleitung (Öko-Durchlass), die ebenfalls mit einem Rollschütz ausgerüstet ist.

Mit der vorliegenden 3D-Dammbauplanung unter Verwendung des Programmsystems iTWO-civil, konnten durch den Baubetrieb die Daten für die Baumaschinensteuerung reibungslos erzeugt werden.

Konstruktive Details

Die Außenflächen der Wände des Durchlassbauwerkes wurden mit einer Neigung von 20:1 ausgebildet. Eine übliche Neigung von 10:1 bis 15:1 würde zu großen Wanddicken im Bereich der Fundamentplatte führen, die gemäß der statischen Bemessung des Bauwerks nicht erforderlich sind. Auch aufgrund der Steilheit der Außenwände musste der Dichtungsanschluss der mineralischen Dichtung an das Massivbauwerk durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen optimiert werden.

Durch das Verziehen der mineralischen Dichtung an das Massivbauwerk und dem Einbau von mittel- bis ausgeprägt plastischem Ton in diesem Anschlussbereich wurden gute Lösungen gefunden. Das Massivbauwerk wird somit an beiden Längsseiten, ausgehend von der wasserseitigen Flügelwand bis zum luftseitigen Ende des HWE-Schachtes, auf ganzer Höhe in Breite von mindestens 1 m bis 5 m mit mittel- bis ausgeprägt plastischem Ton (D1-Material) umhüllt (s. Abbildung 2). Im Anschluss daran wurde gemäß dem Regelquerschnitt des Dammes die geplante Dichtung aus leicht- bis mittelplastischen Ton (D2-Material) eingebaut (s. Abbildung 2).



Abbildung 2: Damm mit Durchlassbauwerk, Bautenstand 09/2017 [TSB]

Deutlich zu erkennen sind in Abbildung 3 die zur Sickerwegsverlängerung angeordneten vertikalen Betonsporne am HWE-Schacht und eine Spundwand, die anstelle eines Dichtungssporns im Tal als Sickerwegverlängerung im Untergrund eingebaut wurde. Vom Entwurfsverfasser war ein Dichtungssporn geplant, für dessen Herstellung eine leistungsstarke bauzeitliche Wasserhaltung und zusätzliche Materialtransporte notwendig geworden wären. Daher wurde in der Ausführungsplanung eine Dichtwand vorgesehen. Die als Spundwand ausgeführte Dichtwand wurde in einem Halbrahmen aus Stahlbeton („Betonschuh“) am Durchlassbauwerk verwahrt und hier im Zuge der Umhüllung der Außenwände mit dem D1-Dichtungsmaterial abgedeckt.



Abbildung 3: Durchlassbauwerk, Bautenstand 05/2017 [TSB]

Bauüberwachung

Seit Baubeginn ist eine örtliche Bauüberwachung (THP) ständig vor Ort und wird vermessungstechnisch durch das Vermessungsbüro Völker unterstützt. Die Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH (IHU) begleitete den Dammbau als Fremdüberwachung mit einem umfangreichen Prüfprogramm. Im Vorfeld des Dammbaus wurden verschiedene Probefelder zur Optimierung der Einbautechnologie angelegt. Der geplante Einbau der Überlagerungsmassen aus der Seitenentnahme erforderte baubegleitend weitere Probefelder.

Zur Sicherung der Qualität des Stahlwasserbaues wurden durch THP eine Fertigungsüberwachung gemäß MeKS und Montageüberwachung als Fachbauleitung durchgeführt. Auch die Konzepterstellung zur Funktionsprüfung und das Überwachen der Funktionsprüfungen waren Aufgaben dieser Fachbauleitung.

Die ingenieurtechnische Kontrolle der Ausführung des Tragwerks auf Übereinstimmung mit den geprüften statischen Unterlagen (Bewehrungsabnahmen) erfolgten durch THP und/oder dem Prüfstatiker Herrn Zeil. Die ökologische Baubegleitung (Büro Knoblich) und SiGeKo (Bauprojekt K. Schmidt GmbH) komplettieren die Baustellenüberwachung.

3.2 Seitenentnahme - Entnahmestelle für das Dammbaumaterial

Zur Gewinnung des Dammbaumaterials waren Seitenentnahmen für Stützkörper- und Dichtungsmaterial im Tal der Wipper ca. 2 km stromaufwärts der Sperrstelle vorgesehen, dessen Genehmigungsverfahren unabhängig vom Planfeststellungsverfahren des HRB durchgeführt wurden. Die Genehmigungsverfahren für die Seitenentnahmen verzögerten sich durch eine Klage, so dass die Baustelle stillstand. Alternativ wurde daher der Fremdbezug der Dammbaumaterialien untersucht. Mögliche Transportstrecken wurden bautechnisch, naturschutzfachlich und bzgl. der Erstellung von zusätzlichen genehmigungsrelevanten Unterlagen bewertet. Als Kompromiss mit dem Kläger wurde auf die Seitenentnahme Dichtungsmaterial verzichtet. Für die Seitenentnahme des Stützkörpermaterials mussten baubegleitend Nacherkundungen erfolgen, weil als Kompromißbestandteil auch eine, wenn auch geringe, Verschiebung des Abbaufeldes weitere Informationen zum Material und den Lagerbedingungen erforderlich machten.

Bedingt durch den Stillstand wurde die Bauleitung des Bauherrn vor große Herausforderungen gestellt. Hier kam die juristische Komponente im Projekt hinzu, die entsprechende Expertisen von Juristen für das Baurecht erforderlich machten.

Der Abbau des Stützkörpermateriails erfolgte gemäß den genehmigten Unterlagen aus 2015. Beim Auffahren der nördlichen Gewinnungsböschung kam es im Juli 2017 zum Abgleiten eines 100 t Felsblockes oberhalb der 1. Abbauebene (s. Abbildung 4). Daraufhin wurden von THP und der Arbeitsgemeinschaft Felsprojekt - Witt & Partner Geoprojekt GmbH + GeoAlpin GmbH weitere ingenieurgeologischen Kartierungen durchgeführt und die Standsicherheitsuntersuchung fortgeschrieben.



Abbildung 4: Seitenentnahme mit abgeglittenem Felsblock 100 t, Bautenstand 07/2017

Zur Berechnung der globalen Böschungsstabilität (Gesamtstandsicherheit nach DIN EN 1997-1) wurden numerische Analysen mit Hilfe des FEM-Programms PLAXIS ausgeführt. Das Programm ermöglicht die Berechnung ebener oder radialsymmetrischer Spannungs-Verformungs-Zustände unter Verwendung verschiedener Stoffgesetze und somit eine wirklichkeitsnahe Abbildung des tatsächlichen Materialverhaltens. Zur Beurteilung der lokalen Böschungsstabilität wurden dreidimensionale gefügemechanische Berechnungen mit dem Programm Swedge ausgeführt. Diese Software ermöglicht die Analyse räumlicher Gleitmechanismen entlang der Verschnaidungslinie mehrerer Trennflächen (Felskeile) in Felsböschungen.

Im Ergebnis waren zur Gewährleistung einer normgerechten Standsicherheit die Böschungen abzuflachen, die Bermen zu verbreitern und in kritischen Bereichen vernagelte Steinschlagschutznetze einzubauen. Die Sicherung erfolgte aushubbegleitend, wobei die maximale Abschlagshöhe 0,5 m unter

der jeweiligen Nagelreihe betrug. Weiterhin erfolgte durch die ingenieurgeologische Baubegleitung eine abbaubegleitende Fortschreibung der Kartierung und die daraus resultierende Fortschreibung der Felssicherung.

Auf Grund der komplizierten geotechnischen Verhältnisse, insbesondere durch eine bezogen auf die Böschungsrichtung ungünstige Orientierung des Trennflächengefüges, erfolgte ein Böschungsmonitoring. Die Abbauarbeiten wurden gemäß Messprogramm an 4 festgelegten Profilen mittels tachymetrischer 3D-Messung überwacht. Zur Durchführung der Messungen war die Montage von Reflektoren auch per Seilzugangspositionierung (SZP) an vorgegebenen Punkten entlang der festgelegten Profile in der Abbauböschung erforderlich. Ziel des Monitorings war es, potentiell mögliche Bewegungen der Böschung in Folge der Abbautätigkeit, wie auch auf Grund von geologischen Prozessen zeitnah zu erfassen und adäquate Gegenmaßnahmen zum Schutz von Personen und Technik bei Erfordernis sofort einleiten zu können.



Abbildung 5: Seitenentnahme mit Messprofilen des Böschungsmonitoring, Bautenstand 04/2019

In das Dammbauwerk waren ca. 120.000 m³ Gesteinsmassen aus der Seitenentnahme und 30.000 m³ Dichtungsmaterial einzubauen. Im Zuge der Lagerstättenerkundung 2017 und den notwendigen geometrischen Anpassungen der Abbaukubatur im Steinbruch war festzustellen, dass die Gesamtmassen im Abbaufeld gerade ausreichend sind. Davon sind jedoch ca. 22.000 m³ als für den Dammbau nicht nutzbare Überlagerungsmassen aus Lockergestein (GU*) abgeschätzt worden. Zur Optimierung des Massenmanagements (Entsorgung, Liefermassen) wurden Varianten zum Einbau des Materials im

Dammquerschnitt untersucht. Da ein Großteil der nicht nutzbaren Überlagerungsmassen bereits frühzeitig anfiel, wurde der Einbau als erste Schüttlagen oberhalb der Dammaufstandsfläche (flach geneigter GU*-Keil) umgesetzt. Weitere Einbauorte liegen außerhalb des statischen Querschnittes in den zur besseren Einbindung in die Landschaft ausgerundeten Hanganschlussbereichen. Damit war lediglich eine Massendefizit von 2.000 m^3 durch Liefermassen auszugleichen.



Abbildung 6: Seitenentnahme, Bautenstand 06/2019

Die zeitliche Verfügbarkeit der Einbaumassen, deren Menge und Qualität erforderte von allen am Bau Beteiligten eine hohe Flexibilität hinsichtlich Untersuchung von Planungsvarianten, Durchführung zusätzlicher Untersuchungen und Einbautechnologien.

Die Ausführung der Bauhauptleistungen (Los 1) erfolgen durch die Arbeitsgemeinschaft HRB Wippra – Jaeger Umwelt + Verkehr GmbH & Co. KG - Jaeger Spezial- und Tiefbau GmbH & Co. KG.

4 Ausblick und Fazit

Die Übergabe des Probestauprogramms und der vorläufigen Betriebsvorschrift macht den Weg frei für die geplante Inbetriebnahme des Beckens 2020. Das Projekt ist ein Beispiel für den heute notwendigen interdisziplinären Wasserbau in Planung und Ausführung und zeigt die Komplexität derartiger Aufgaben.

5 Literatur

Carstensen, Dirk; Rudolf, Andreas; Sattler, Robert; Heß, Max; Vollweiler, Tilo (2014): Wasserbauliche Modellversuche für die Hochwasserentlastung und Betriebsauslässe des HRB Wippra. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Dresden 2014

Kanzow, U. (2018): Technische Lösungen für aktuelle Dammbauprojekte in Deutschland, 48. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA), Aachen, 19.01.2018

Tönnis, B. (2017): Aktuelle Erfahrungen bei Planung und Bau von Dichtungen an Staudämmen von Talsperren und HRB. Nürnberger Wasser-Symposium 2017, 14.12.2017

Tractebel Hydroprojekt GmbH / Lahmeyer Hydroprojekt GmbH (2013-2018): Planungsunterlagen HRB Wippra (unveröffentlicht), Weimar 2013-2018

Autoren:

Dipl.-Ing. Lars Scharschmidt

Dipl.-Ing. Andreas Rudolf
Dipl.-Ing. Sigrid Schulmann

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Geschäftsbereich Weimar
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt
Anstalt öffentlichen Rechts
Timmenröder Str. 1a
38889 Blankenburg/Harz

Tel.: +49 3643 746 305
Fax: +49 3643 746 435
E-Mail: lars.schaarschmidt@
tractebel.engie.com

Tel.: +49 3944 942 215
Fax: +49 3944 942 200
E-Mail: info@talsperren-lsa.de

Staudamm Roßhaupten – Nutzung des Digital Twin in der Ausführung

Marcus Daubner, Torsten Henßler

Die BAUER Spezialtiefbau GmbH verfolgt den Ansatz einer systematischen, digitalen Erfassung aller relevanten Daten aus Planung, Herstellung und Qualitätskontrolle sowie deren integrale Vernetzung und automatisierte Auswertung. Vor allem die weitergehende Nutzung der Plandaten im Herstellprozess und die automatisierte Auswertung von Produktionsdaten zur Optimierung der Bauausführung und zur Sicherung des Qualitätsprozesses stellen ein zentrales Anliegen dar.

1 Projektbeschreibung

Idyllisch im sogenannten Königswinkel zwischen Füssen, Pfronten und Schwangau gelegen, erstreckt sich der Forggensee auf einer Fläche von rund 15,2 km². Als fünftgrößter See Bayerns und flächenmäßig größter Stausee Deutschlands dient der vom Lech durchflossene Stausee sowohl der Stromerzeugung als auch der Hochwasserregulierung nach Einsetzen der Schneeschmelze in den Alpen. Bereits in den 1950er Jahren fertiggestellt, bildet die Staustufe Roßhaupten die nördliche Talsperre des Sees und zugleich den Zufluss des Wasserkraftwerks mit einer Leistung von 45 MW bei einer Fallhöhe von 35,4 m.

Um das Kraftwerk und auch den Hochwasserschutz für die Zukunft zu rüsten, wurde im Mai 2018 damit begonnen, die Dammbabdichtung zu erneuern. Der Kraftwerksbetreiber Uniper Kraftwerke GmbH hat zu diesem Zweck die BAUER Spezialtiefbau GmbH mit der Ausführung von 13.500 m² Schlitzwand zur Abdichtung des Damms beauftragt. Die besonderen Herausforderungen bei diesem Projekt: Die Schlitzwand kann nur von der mit 11 m Breite sehr schmalen Dammkrone aus hergestellt werden und liegt zudem nicht in der Mitte des Damms, sondern ungünstig versetzt an der Seite der Dammkrone. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse wurde zu Beginn der Arbeitsvorbereitung entschieden, den Bestand und die auszuführenden Spezialtiefbauelemente als 3D BIM Modell aufzusetzen.

2 Allgemein

Die Daten auf Baustellen sind vielseitig und oft nur schwer für alle beteiligten erfassbar. Durch den Ansatz der systematischen Erfassung von Daten in allen Zyklen eines Projekts soll dies erleichtert werden. Soll-Daten die während der Planung erstellt wurden, sollen kontinuierlich mit den Ist-Daten auf dem Baufeld abgeglichen werden. Ebenso sollen erfasste Daten direkt in die Dokumentation einfließen. So entsteht als „Nebenprodukt“ eine As-Built Dokumentation. Zudem lässt sich die Qualität der Arbeiten prüfen, wie beispielsweise Lage und Menge der produzierten Bauteile. Ziel ist es, alle Daten einmal zu erfassen und zentral zu speichern. Alle Projektbeteiligten haben Zugang zu den aufbereiteten Informationen und können diese für ihre Zwecke nutzen.

3 Planung

3.1 3D-Planung

Da die beengten Verhältnisse auf der Dammkrone eine genaue Planung voraussetzten, wurde beschlossen ein strukturiertes 3D-Modell zu erstellen. Die Erfassung der komplexen Geländegeometrien wurde hierbei schon in der Planungsphase durch photogrammetrische Drohnenscans realisiert und bei der Arbeitsvorbereitung verwendet.

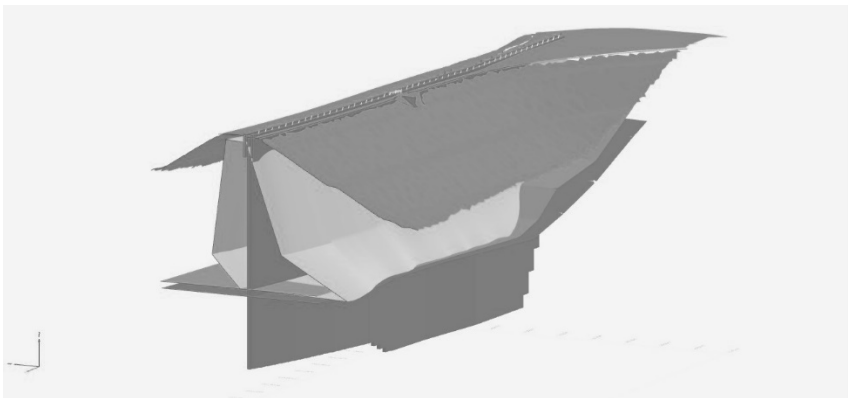


Abbildung 1: Strukturiertes 3D-Modell zur Visualisierung der Bauaufgabe im Bestand

3.2 4D-Modell zur Geräteablaufsimulation

Auf der Dammkrone ist es nicht möglich, zwei Geräte aneinander vorbei zu bewegen. Darum wurde die Taktung der Maschinen in einer 4D-Ablaufsimulation geplant. Wichtig war es, die einzelnen Bauschritte genau zu planen und einen störungsfreien Baubetrieb während der Maßnahme zu garantieren. Verschiedene Szenarien konnten so durchgespielt werden. In den einzelnen Varianten konnte die Anzahl der Maschinen, Umsetzungsmomente und Bauschritte verändert und eine Analyse der einzelnen Optionen gemacht werden.

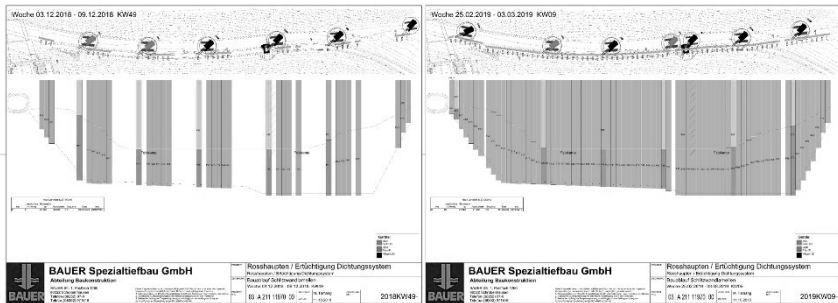


Abbildung 2: Baufortschrittskontrolle und Bausequenz

4 Baubegleitende Aufnahme des Ist-Zustands ins Modell

In allen Bauphasen, von der Erkundung bis zur Übergabe, wurden alle Informationen wie beispielsweise Vermessungsdaten elektronisch erfasst und im Modell visualisiert.

4.1 Erkundungsarbeiten

Vor Baubeginn wurden Erkundungsbohrungen mit einer Gesamtlänge von 550 m am Damm durchgeführt. Die längste Bohrung reichte bis in eine Tiefe von 91 m. Lage und Tiefe der Bohrlöcher wurden durch Scans und Vermessung geprüft und die Daten im Anschluss über Skripte teilautomatisiert in ein 3D-Modell übernommen. Weiter wurden auch die Ergebnisse der Lugeon Tests ins Modell übertragen und so Störzonen im Fels visuell aufbereitet.



Abbildung 3: Bohrlochbefahrung und Vermessung

4.2 Injektionsarbeiten am Dam

Während der Bauausführung erfolgten weitere Bohrungen für Injektionen zur Abdichtung des Damms, mit einer Gesamtlänge von 1100m. Auch diese Arbeiten wurden digital erfasst und sind vollständig ins Modell eingeflossen. Die injizierten Mengen wurden aufgezeichnet und sind im Modell visualisiert. Hierbei lässt sich erkennen wieviel Material in welcher Tiefe eingebracht wurde.

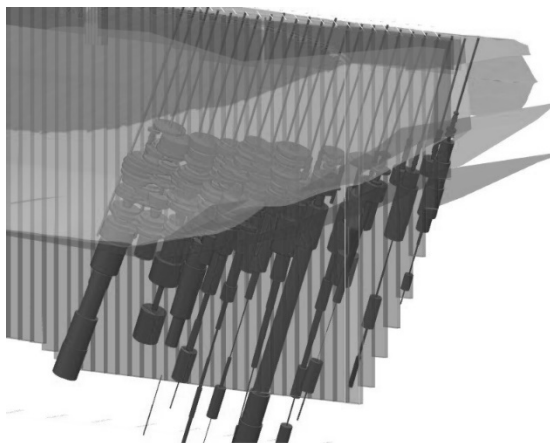


Abbildung 4: Visualisierung aller durchgeführten Erkundungs- und Injektionsbohrungen mit zugehörigen Lugeon Werten bzw. Injektionsmengen

4.3 Herstellung der Schlitzwand

Durch in den Maschinen verbaute Sensorik werden die Schlitzwandarbeiten erfasst. Lage und Tiefe eines Stichts werden dabei automatisch aufgenommen. Beim Projekt Roßhaupten kam zusätzlich das von BAUER patentierte Cutter Inclination System (CIS) zum Einsatz. Dieses System zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass die Fräse während der Durchführung der Messung in der Schlitzwandlammelle verbleiben kann und somit kein separates Messsystem in die ausgehobene Schlitzwandlammelle abgeteuft werden muss. Die Vermessungsdaten aus dem CIS System wurden ebenfalls teilautomatisiert ins Modell übernommen und später in ein konsolidiertes Gesamtmodell überführt.

4.4 Baubegleitende Ablaufvisualisierung

Die während der Vermessung des ausgehobenen Schlitzes gewonnenen Daten wurden zur Prüfung und Visualisierung des Baufortschritts genutzt. Dabei wurden die Daten baubegleitend im Modell visualisiert. So konnten die bereits im Boden verbauten Dichtwandelemente für jedermann sichtbar und der Baufortschritt transparent gemacht werden.

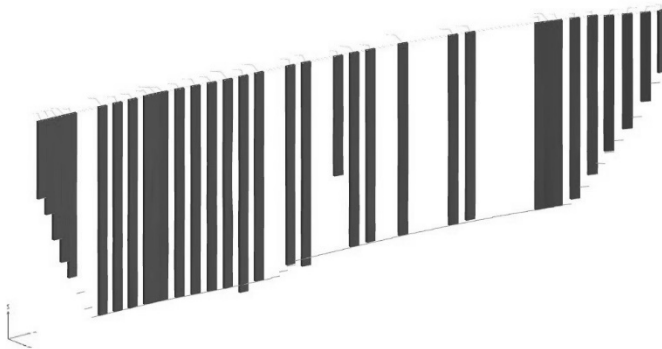


Abbildung 5: Visualisierung des aktuellen Baufortschrittes

4.5 Einsatz Mobiler Endgeräte CoW

Durch die in den Maschinen verbauten Funkmodule können alle Arbeiten über ein internetfähiges Endgerät abgerufen werden. Hierzu wird das Web-

BGM genutzt. Alle Daten sind in Echtzeit verfügbar und spiegeln die Daten des Monitors in der Fahrerkabine wieder.

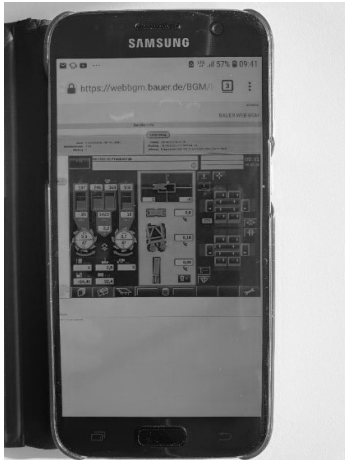


Abbildung 6: Darstellung Web-BGM auf Mobilem Endgerät

5 Qualitätssicherung – Modellbasierte Überschnittprüfung

Zur baubegleitenden Überprüfung der Lagegenauigkeit der einzelnen Schlitzwandlamellen wurden die erfassten CIS Vermessungsdaten in das BIM Modell eingelesen. Die As-Built Planung wurde so automatisch erstellt. Dies ermöglichte es, fortlaufend einen Soll-Ist Abgleich der Arbeiten zu erhalten.

Anhand des Modells wurde auch die Einhaltung der Überschnitte der einzelnen Lamellen zueinander überprüft. Dies diente der kontinuierlichen baubegleitenden geometrischen Qualitätsprüfung der geschuldeten Leistungen.

Vor allem bei automatisierbaren, geometrischen Prüfungen zeigt die 3D-Modellierung des Ist-Zustandes ihre Leistungsfähigkeit in der baupraktischen Anwendung. Die Möglichkeit, ohne nennenswerten Mehraufwand, eine engmaschige Prüfung der Wandscheibe durchzuführen, bietet der Produktionssteuerung zeitnah Sicherheit in der qualitativen Erstellung der Bauaufgabe. Es ermöglicht gegeben falls ein kurzfristiges Anpassen der Produktionsparameter und garantiert dem Bauherrn eine lückenlose Prüfung der hergestellten Wandscheibe.



Abbildung 7: Automatisierte, geometrische Überschnittprüfung der Schlitzwandlamellen zueinander

6 Ableitung der Bestandsdokumentation aus dem Modell

Durch das konsequente, baubegleitende Erfassen der Produktionsparameter im 3D Modell, konnte die geforderte 2D Bestandsdokumentation mit sehr geringem Aufwand abgeleitet und an den Kunden übergeben werden.

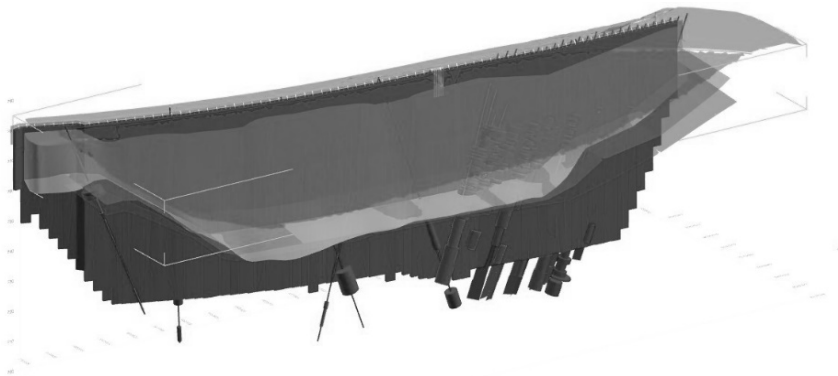


Abbildung 8: Bestandsmodell nach Fertigstellung der Arbeiten

7 Fazit

Die Produkte des Spezialtiefbaus sind nach Fertigstellung nur sehr selten visuell prüfbar. Die Dokumentation der Geometrie erfolgt überwiegend über maschinelle Datenaufzeichnungen oder digitale Vermessung. Gerade dieser hohe digitale Erfassungsgrad der Spezialtiefbauprodukte bietet schon heute die Grundlage, um den Digital Twin teilautomatisiert und mit hohem Informationsgehalt zu generieren.

Die sinnvolle Sammlung und Auswertung der im gesamten Bauprozess gewonnenen Informationen birgt nicht nur ein enormes Potential zur Automatisierung der zeitaufwändigen und personalintensiven Qualitätsprüfungs- und Dokumentationsprozesse, sondern stellt vor allem ein neues Werkzeug zur Unterstützung der verantwortlichen Ingenieure dar.

Gerade die zeitnahe visuelle Aufbereitung komplexer Sachverhalte oder der Einsatz automatisierter Qualitätsprüfläufe sind ein essentieller Beitrag zum Verständnis der aktuellen Bausituation und des Qualitätslevels der Produktionsprozesse und bilden somit eine solide Grundlage zur Reduzierung der Fehlerkosten.

Autoren:

Dipl.- Ing. Marcus Daubner

Dipl.- Ing. Torsten Henßler

BAUER Spezialtiefbau
BAUER-Straße 1
86529 Schrobenhausen

BAUER Spezialtiefbau
BAUER-Straße 1
86529 Schrobenhausen

Tel.: +49 8252 97 2377
E-Mail: marcus.daubner@bauer.de

Bewertung von technischen Lösungen im modernen Hafenbau

Oliver Hechler
Oliver Gregor
Ernst Weber

Um Investitionen in den Hafenbau optimal und nachhaltig einzusetzen ist es wichtig, eine Bewertungsmethode zu entwickeln, die es erlaubt, unterschiedliche Bauweisen von der Konzeptstudie bis zum Ende der Nutzungsdauer zu vergleichen.

Weltweit sind verschiedene Bauverfahren für die Ausführung von Kaiwänden standardisiert, wie z. B. Schwergewichtsmauern, Pfahlroste oder rückverankerte Wandkonstruktionen. Besonders in den Niederlanden und in Deutschland werden häufig kombinierte Spundwandssysteme eingesetzt.

Verschiedene Faktoren sind für die Wahl des Entwurfs (Lösung bzw. Baumaterial), die Bemessung und den Bau von Kaiwänden zu berücksichtigen. Neben den geologischen Bedingungen sind Tide, äußere Lasten aus Kranbetrieb und Lagerflächen sowie verfügbare Baugeräte relevant. Auch beeinflussen lokale Erfahrungen die Entscheidung über das Bauverfahren. In jedem Fall müssen die Rückhaltefunktionen für Boden und Wasser, Lastabtragung von Verkehrslasten und sicheres Anlegen von Schiffen sowie rasches Be- und Entladen erfüllt werden.

Eine von Tractebel (Belgien) durchgeführte Studie untersucht die Einflüsse verschiedener Faktoren im Hinblick auf Planung, Kosten und Umwelteinwirkungen von Seehäfen. Sie legt Vorschläge zu Kriterien vor, die die Identifizierung und Quantifizierung der Stärken und Schwächen verschiedener Konstruktionsweisen erlauben. In einem ersten Schritt werden die Bauweisen Stahlspundwand und Schlitzwand zum Bau eines Kreuzfahrtterminals miteinander verglichen.

In dieser Studie wurden umfassende Ansätze für ein System zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung von Kaimauern im Hafenbau über deren gesamten Lebenszyklus entwickelt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass für die betrachteten Einzelfälle eine Bewertung bereits möglich ist.

Stichworte: Hafenbau, Kaimauer, Spundwand, Schlitzwand, Bewertung, Lebenszyklus, Kosten, Umwelteinwirkung

1 Einleitung und Motivation

Der weltweite Güterverkehr wächst kontinuierlich. Nicht nur die Anzahl der eingesetzten Schiffe, sondern auch deren Größe nimmt stetig zu. Nach Schätzungen des BMWi werden die Umschlagvolumina der 19 größten deutschen Seehäfen von 269 Mio. Tonnen in 2010 auf ca. 468 Mio. Tonnen in 2030 steigen. Auch in der Wertschöpfungskette der Offshore-Windenergie nehmen Häfen eine zentrale Stellung ein. Für den Bau von Offshore-Windparks sind Häfen der Knotenpunkt, den alle Anlagenteile passieren müssen. Leistungsfähige Häfen mit bedarfsgerechter Hinterlandanbindung sind wesentliche Voraussetzungen für die maritime Logistik. Ein sukzessiver Ausbau der Häfen ist damit unverzichtbar.

Neben der raschen Entwicklung bei den Schiffsgrößen ist der Klimaschutz ein treibender Faktor zur Aufwertung von bestehenden Strukturen und/oder Motivation zu neuen Projekten. So musste beispielsweise die Hauptdeichlinie in Hamburg von 1962 bis heute um rund 2,50 m erhöht werden. Für die Zukunft ist ein weiterer, deutlicher Anstieg des Meeresspiegels zu erwarten. In den Niederlanden wird für aktuelle Maßnahmen ein Szenario mit einem angenommenen Meeresspiegelanstieg um 0,85 m bis 1,30 m im Jahr 2100 zu Grunde gelegt. Allerdings mehren sich Erkenntnisse und Einschätzungen, dass der Anstieg des Meeresspiegels schneller ablaufen und damit im Jahre 2100 deutlich höher ausfallen könnte.

Die European Sea Ports Organization schätzt, dass die Investitionspipeline für international Häfen im Zeitraum 2018 - 2027 rund 5 Mrd. EUR pro Jahr betragen wird. Die United Nations Conference on Trade and Development überschlägt, dass, auch aufgrund des Klimawandels, in den nächsten 50 Jahren bis zu 500 Mio. US-Dollar pro Seehafen investiert werden müssten, um die globalen Hafen- und Wasserstraßenstrukturen sowie die Hochwasserschutzsysteme zu verbessern.

2 Bewertung von Ausführungsvarianten einer Kaiwand

Um die Finanzmittel optimal und nachhaltig einzusetzen ist es wichtig, eine Bewertungsmethode für den Hafenbau zu entwickeln, die es erlaubt, unterschiedliche Bauweisen von der Konzeptstudie bis zum Ende der Nutzungsdauer zu vergleichen. Hierzu wurde ein Kriterienkatalog für Kaiwände im Rahmen einer Untersuchung der Abteilung Wasserbau des belgischen Ingenieurbüros Tractebel, in Zusammenarbeit mit ArcelorMittal, vorgeschlagen. Dabei wurden baupraktische Fragen, ökonomische Faktoren, Betriebskosten

und Umweltaspekte betrachtet. Ziel war es, Optimierungspotentiale aufzuzeigen und zu bewerten, damit diese bereits in der Planung anstehender Projekte berücksichtigt werden können.

Als Kriterien zur Bewertung von Bau und Betrieb einer Kaiwand wurden Herstellungskosten, Bauzeit, Instandhaltungs- bzw. Wartungskosten, Rückbaukosten, Wirtschaftlichkeit und Umwelteinwirkung identifiziert. Diese werden maßgeblich von der nautischen Lage des Hafens (z.B. für Kosten und Transportwege) und der Nutzung der Kaiwand sowie die damit verbundenen geometrischen Anforderungen, Bodenprofil als auch Einwirkungen und Bemessungsnormen beeinflusst. Zusätzlich sind Baujahr und Lebensdauer zu berücksichtigen. Mit Wahl der Bauweise (Materialien, statisches System und Ausführung, z.B. von Land oder Wasser aus) ergeben sich somit Planungsaufwand, Kosten für Baustelleneinrichtung und Baufelddräumung, Allgemeinkosten der Baustelle und Kosten der Bauausführung. Die Bewertung erfolgt mittels qualitativer und quantitativer Faktoren, welche die neuesten Entwicklungen für sicheres und nachhaltiges Bauen berücksichtigen.

3 Vergleich von Ausführungsvarianten einer Kaiwand

3.1 Beschreibung des Vergleichsprojekts und Annahmen

Um die Bewertungsmethode zu testen wurde ein Vergleich von Ausführungsvarianten durchgeführt. Dazu wurde das Beispiel des Neubaus einer 200 m langen Kaiwand für ein in Zentral- oder Nordeuropa (Antwerpen) gelegenes Kreuzfahrt-Passagier-Terminal gewählt. Baubeginn ist 2020 und die Lebensdauer wurde auf 50 Jahre festgelegt. Die Bemessung der Alternativen erfolgte nach EN 1997, Nachweisverfahren 1, unter Annahme von Korrosionsverlusten gemäß EN 1993-5, einem Tidehub von 3,0 m, keiner seismischen Aktivität und geringer Wellen- und Strömungsbelastung. Die zusätzlichen Lasten umfassen eine gleichmäßig verteilte Last auf dem Kai von 20 kN/m^2 sowie Halte- und Anlegelasten nach BS 6349. Die laterale Verformung wurde nicht eingeschränkt. Es wurden allgemein verfügbare Baustoffe gewählt (Spundwand nach EN 10248, Stahlbetonbauteile in Klasse C40/50, Bewehrungsstahl der Güte 500 C, die Stahllanker mit Materialfestigkeit von 500 MPa und die Verpressanker aus Stahlzuggliedern der Güte 1770 MPa aus Spanndrahtlitzen mit 15,3 mm Durchmesser). Unterschiede in Deckwerk, Befestigungen und Anbauten sind nicht Bestandteil der Studie. Der Kolkschutz vor der Kaiwand zur Verhinderung von Erosion des Meeresbodens ist enthalten. Herstellung erfolgt landseits, unter der Annahme üblicher Bauausführung, ohne besondere Einschränkung. Aushubtoleranzen und überhöhter Aushub (Nassbagge-

rei) sind im minimalen Aushubniveau enthalten. Weitere Angaben und Annahmen können [Tractebel 2019] entnommen werden. Ein Entwurf der Kaiwand in Spundwandbauweise mit Ankerwand ist in Abbildung 1 dargestellt. Im Folgenden wird die Vergleichsstudie verkürzt vorgestellt.

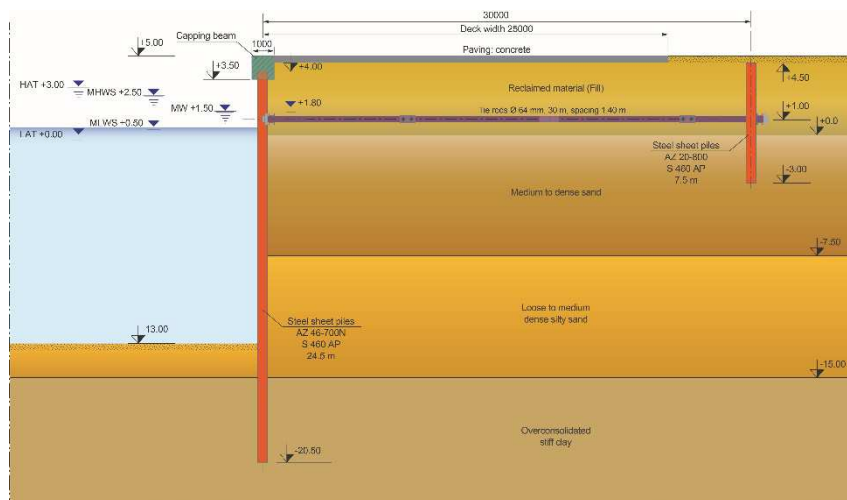


Abbildung 1: Entwurf einer Kaiwand in Spundwandbauweise [Tractebel 2019]

3.2 Herstellungskosten

Die Einheitskosten wurden bestehender Datenbanken entnommen, die Informationen von Händlern, Baufirmen und veröffentlichte Preisangaben [SPON's book 2018] beinhalten. Sie wurden mit Hilfe des europäischen Baupreisindex sowie der Inflationsrate der letzten 10 Jahre angepasst. Die in Tabelle 1 aufgeführten Annahmen sind den Einheitspreisen zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die Gesamtkosten für die betrachtete Kaiwand in Spundwandbauweise wurden zu 6 Millionen €, für die Schlitzwandbauweise zu 6,9 Millionen € ermittelt. Somit ergibt sich für die Ausführung in Spundwand eine Kostenersparnis von 13% gegenüber der Ausführung als Schlitzwand.

Das Stahlmaterial der Haupt- und Ankerwand stellt den größten Anteil an den Baukosten für die Spundwand dar und beträgt etwa 2,2 Millionen € (38%). Zusätzlich werden 1,03 Millionen € (17%) für Erdarbeiten aufgewendet, gefolgt von 540.000 € für Stahlbetonarbeiten.

Für die Schlitzwand entfallen ca. 2,6 Millionen € (38% der Gesamtkosten) auf die bewehrte Betonkonstruktion. Die Kosten für die Erdarbeiten liegen etwas höher als bei der Spundwandausführung bei 1,1 Millionen € (16%).

Tabelle 1: Annahmen zu den Einheitspreisen [Tractebel 2019]

Position	Annahme
Stahlpundwände (SSP)	<ul style="list-style-type: none"> - Materialpreis inklusive Transportkosten im Umkreis von 100 km, ohne Beschichtung oder andere Oberflächenbearbeitung. - Einbaupreis für Maschinen mit Bedienung von Land, Auf- und Umbaukosten, sowie Wartezeiten.
Anker	<ul style="list-style-type: none"> - mit Beschichtung, Kupplungsstücke, Hüllrohre, Abdeckungen, Transportkosten. - Bohren inkl. Maschinentransport und Entsorgung des Bohrguts. - Einbau und Verpressen: Maschinen-, Arbeits- und Transportkosten.
Erdarbeiten	<ul style="list-style-type: none"> - Nassbagger: Mobilisierung in der Nähe der Baustelle (25km), Kosten für Maschine mit Bedienung, tägliche An- und Abfahrt, Arbeit in 12 Stunden Schichten mit bis zu 10.000m³; Aushubmaterial unbelastet, wird entweder auf Baustelle deponiert oder weiterverwendet. - Erdarbeiten im Fels (Bodenklasse 6-7): mit schwerem mechanischen Gerät und Kontrolle der entstehenden Vibrationen. - Füllmaterial: Kies/Sand Gemisch mit enger oder weiter Sieblinie, ohne Feinanteile, Lieferung aus der Nähe der Baustelle. - Schlitzwand: Bentonitanlage, Lagerung und Entsorgung Aushubmaterial.
Schlitzwand	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung inklusive Baus einer Arbeitsplattform (wird am Bauende verfüllt).
Betoneinbau	<ul style="list-style-type: none"> - Sämtliche notwendigen Maschinen und Wartezeiten. - Schalung mit Liefern und Einbau, bis Höhe 3,5 m, Oberflächenbeschaffenheit F1.
Ausrüstung	<ul style="list-style-type: none"> - 4 m Tiefe Fender mit UMHWPE Teilen. - "Additional furniture" (zusätzliche Einrichtung): Liefern und Einbauen von Leitern, Kantenschutz, Rettungsringen, Beleuchtung und ähnlichem.
Rückbau	<ul style="list-style-type: none"> - Planungen, Zugang und Sicherheitskosten und temporäre Bauarbeiten

3.3 Kosten für den Rückbau

In verschiedenen Ländern der Erde hat der Verursacher des Bauwerks später auch für dessen Beseitigung die Verantwortung zu tragen. Deshalb wurde der Rückbau in die Bewertung mit aufgenommen. Der Rückbau erfolgt nach dem Schema: Aushub hinter der Verbauwand (Vermeidung von strukturellem Versagen); Rückbau der bestehenden Strukturen; Nass- oder Trockenbagge- rei von Restmassen (nur Schlitzwand). Der Abbruch „Stahlbeton“ umfasst den Einsatz von Abbruchwerkzeugen und Brechern, sowie die Trennung von Stahl und Beton. Des Weiteren wird angenommen, dass die Schlitzwand nur bis zur Hafensohle abgebrochen wird, und alle tiefer liegenden Teile der Wand im Boden verbleiben. Für die Spundwand wird angenommen, dass 90% des Materials wiedergewonnen werden kann. Die Bewertung erfolgt zum Schrottpreis. Die Abbruchkosten beinhalten Zeiteffekte und es wird ange-

nommen, dass die Preise sich ähnlich der der Kapitalverzinsung erhöhen. Basierend auf dem internen Datenbestand von Tractebel und den getroffenen Annahmen können die Kosten für den Rückbau nach 50 Jahren gemäß Tabelle 2 abgeschätzt werden, woraus sich ein zusätzlicher Kostennachteil für die Schlitzwand im Vergleich zur Spundwandbauweise ergibt.

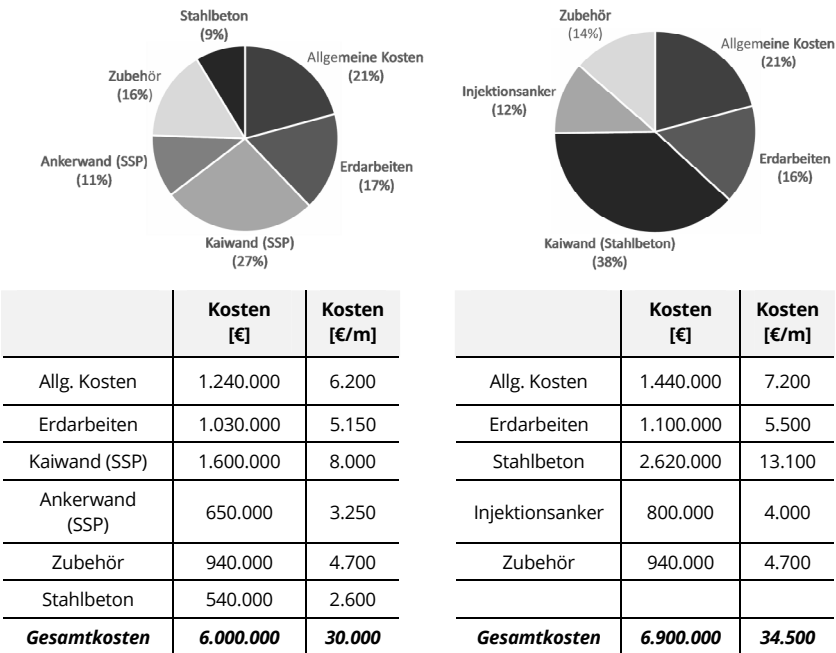


Abbildung 2: Kostenvergleich der reinen Baukosten: Spundwand (SSP) - Gesamtkosten 6,0 Mio. €, Schlitzwand – Gesamtkosten 6,9 Mio. € [Tractebel 2019]

Tabelle 2: Kostenzusammenstellung für den Rückbau [Tractebel 2019]

Entstehungsjahr	Spundwand [€]	Schlitzwand [€]
2020	387.500	910.300
2070	1.713.500	4.936.300

3.4 Bauzeit

In der vorliegenden Studie wurde die Bauzeit als Wert „laufende Meter Wand pro Arbeitstag“ definiert. Dies beinhaltet den Bau der eigentlichen Kaiwand sowie aller notwendigen Nebenarbeiten wie Erdarbeiten, Baubehelfe und Temporärbauwerke. Nicht eingerechnet sind die Überbauten, Ausrüstungen

und alle nicht direkt notwendigen Arbeiten zur Herstellung des Hauptbauwerks. Der Bauzeitenvergleich der Ausführung in Spundwandbauweise zu der als Schlitzwand ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Zeitersparnis der Spundwandausführung beträgt für dieses Beispiel 20%. Sofern Zeiten für den Rückbau zu berücksichtigen sind, wirkt sich dies zusätzlich zu Gunsten der Spundwandbauweise aus.

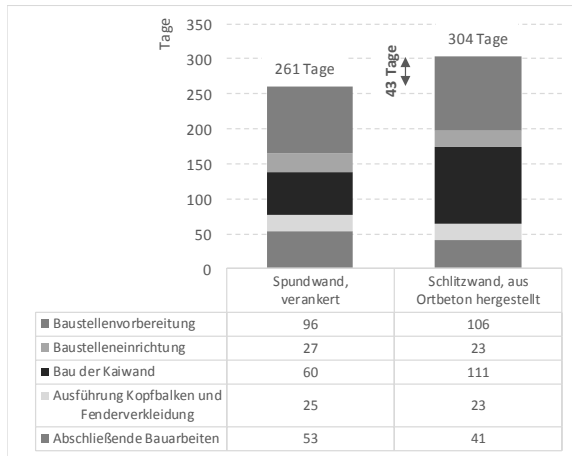


Abbildung 3: Vergleich der Bauzeiten [Tractebel 2019]

3.5 Wirtschaftlichkeit

Für den Return-On-Investment (ROI) wird in der vorliegenden Studie näherungsweise die Zeit der Generierung von Gewinnen betrachtet. Die Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit basieren auf der Annahme eines linearen Wachstums von 3% zuzüglich eines Wachstumsfaktors von 1,025 pro Jahr mit Steigerung des Nettogewinns des Terminals nach einem Jahr Betrieb. Die Verzinsung wurde zu 1,6% angenommen. Einflüsse aus Inflation werden nicht einbezogen. Der jährliche operative Gewinn wurde mit 520.000€ abgeschätzt, wobei Kosten für Wartung und Instandhaltung berücksichtigt sind. Es wird weiter angenommen, dass das Anfangskapital des Terminalbetreibers dem maximalen Investitionsvolumen (CAPEX) entspricht. Gewinne einer bestimmten Zeit „j“ werden partiell reinvestiert und generieren wiederum Profite im Zeitraum „j+1“ mit der definierten Verzinsung. Auch werden Einsparungen im ursprünglichen Investitionsplan reinvestiert und generieren Wachstum in der vorgegebenen Wachstumsrate. Daraus ergibt sich, dass die Ausführung mit Spundwand, welche in den Kosten etwa 900.000€ niedriger liegt als die der

Schlitzwand, im Vergleich einen 2 Jahre früheren und somit 20% schnelleren ROI erzielt.

Zusätzlich wurden die Rückbaukosten für die Bauweisen in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen. Der Rückbau einer Betonkonstruktion ist um den Faktor 3 teurer als der einer Stahlspundwandlösung, sofern ein vollständiger Rückbau der Betonwand überhaupt möglich ist. In der Studie wird davon ausgegangen, dass der Teil der Schlitzwand unter der Hafensohle im Boden verbleibt.

Neben den geringeren Baukosten für die Ausführung in Spundwandbauweise, verglichen mit der Schlitzwandausführung, erhält man nach 25 Jahren 1,5 Millionen € zusätzlichen Cash Flow, der sich auf 6 Millionen € nach 50 Jahren summiert.

3.6 Umwelteinwirkung

Die in der Vergleichsstudie berücksichtigten Ausführungsvarianten wurden auch unter dem Gesichtspunkt der Umwelteinwirkung anhand messbarer Umweltkennzahlen, wie Treibhauspotential (CO_2 -Äquivalent), während der Lebensdauer der Struktur, sowie Verkehrsstörungen (Belastung des Straßennetzes) während des Baus, analysiert. Die Ökobilanz (LCA) für die Lebensdauer der Struktur wurde mit Hilfe einer „Cradle to Grave“-LCA mit Optionen ermittelt, die die maßgeblichen Phasen der Ökobilanzen von Bauprodukten berücksichtigt. Sofern verfügbar, wurden die Daten aus Umweltproduktdeklarationen (EPD) verwendet, wobei das Potenzial der Recyclingfähigkeit (Option: Modul D) berücksichtigt wurde. Sofern keine EPD vorlag, wurden die Sachbilanzen aus zuverlässigen Datenbanken und aus durch Fachleute überprüfter Literatur entnommen. Für angesetzte Geräte und Ausrüstung zur Wartung sowie Geräte zum speziellen maritimen Einsatz wurden die Werte spezifischen Quelldatensätzen entnommen. Zur Abschätzung der Auswirkungen infolge der Transporte wurde angenommen, dass sich vor Ort ein Betonwerk in einem Umkreis von 10 km befindet. Die Anlieferung des Betons erfolgt mittels Mischfahrzeugen mit einer Kapazität von 12 m^3 . Die Spundwände werden mit der Bahn von Esch-Belval, Luxemburg, angeliefert. Wann immer Informationen zu den ergänzenden Effekten (Wiederverwendung oder Recyclingfähigkeit) nicht in der EPD enthalten waren, wurde die Substitutionsmethode angewendet [Hammond and Jones, 2008]. Die damit verbundenen Emissionen für die Baumaterialien wurden entsprechend dem jeweiligen Produktpotential angepasst, das am Ende ihrer Lebensdauer recycelt werden kann. Die Schlitzwand wurde als bis zur Hafensohle im Boden

verbleibend angenommen, da ein Rückbau der Schlitzwand unterhalb als mit vertretbarem Aufwand nicht möglich eingeschätzt wurde.

Es ist anzumerken, dass sich der Beitrag der Betriebs- und Wartungsphase zur Ökobilanzierung verringert, sofern keine energieintensiven Systeme, wie z. B. Kathodischer Korrosionsschutz durch Fremdstrom, eingesetzt werden [Rens 2013].

Die Analyse der Daten für eine Kaimauer, in den oben definierten Anwendungsgrenzen, ergibt, dass das globale Treibhauspotential z. B. der Spundwandlösung mit Verankerung im Vergleich zu einer aus Ort beton hergestellten Schlitzwand um 25% niedriger ist. Zur Darstellung der Ergebnisse, siehe Abbildung 4, wurde das Treibhauspotential in k€ gemäß der Monetarisierungsmethode von DUBOCALC ausgedrückt. Diese Methode wird in den Niederlanden zur Bewertung der ökologischen Qualität angewendet und wurde speziell für die EMAT-Beschaffungsstrategie (Economically Most Advantageous Tender – Bewertung für die Vergabe öffentlicher Ausschreibungen zur besseren Erfassung des Wert/Preis-Verhältnisses) entwickelt. Es werden dabei 50 € pro Tonne CO₂-Äquivalent in der Bewertung angesetzt.

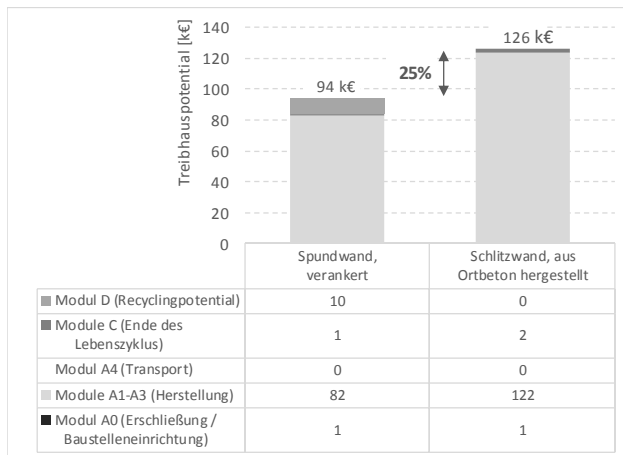


Abbildung 4: Vergleich des monetarisierten Treibhauspotentials [Tractebel 2019]

4 Zusammenfassung und Ausblick

International werden in den nächsten Jahren hohe Investitionen zur Erhaltung und Erweiterung von Hafen- und Wasserstraßenstrukturen sowie Hochwasserschutzsystemen benötigt. Ein optimaler und nachhaltiger Einsatz der erforderlichen Mittel ist demnach unerlässlich. Bewertungsmethoden von Lösungen z. B. im Hafenbau sind demnach zu entwickeln, die es erlauben, unterschiedliche Bauweisen von der Konzeptstudie bis zum Ende der Nutzungsdauer zu vergleichen.

Eine von Tractebel (Belgien) durchgeführte Studie zur Bewertung von Kaiwänden definiert Kriterien und erfasst die Einflüsse relevanter Faktoren im Hinblick auf Planung, Preis (LCC) und Umwelteinwirkung (LCA). Sie erlaubt somit eine Identifizierung und Quantifizierung der Stärken und Schwächen verschiedener Konstruktionsweisen. In einem ersten Schritt wurde die Bauweise Stahlspundwand mit der Schlitzwandbauweise zum Bau eines Kreuzfahrtterminals in einem Nordeuropäischen Hafen diesbezüglich verglichen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Spundwandbauweise 13% günstiger als die Betonbauweise ist, eine 20% schnellere Bauausführung erlaubt und bis zu 25% weniger CO₂-Emissionen erzeugt. In der Studie von Tractebel wurden somit umfassende Ansätze für ein System zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung von Kaimauern im Hafenbau über deren Lebenszyklus entwickelt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass für die betrachteten Einzelfälle eine Bewertung bereits möglich ist.

5 Literatur

- Tractebel (2019): SIMIn Ports and Harbours: The Formula for Steels of the Future. ArcelorMittal Internal Report.
- CRC Press (2017): Spon's Architects' and Builders' Price Book 2018. ISBN-13: 978-1138091634
- EPDs. Institut Bauen und Umwelt e.V. <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/>: ArcelorMittal, EcoSheetPiles™ (2018); ArcelorMittal, Rebar (2016); Beton der InformationsZentrum Beton GmbH, Druckfestigkeitsklasse C 35/45 (2018)
- G.P. Hammond, C.I. Jones (2008): Embodied energy and carbon in construction materials, Proc. Instn Civil Engrs: Energy, 161 (2): 87-98
- International Association of Ports & Harbors (2009): World Ports Climate Initiative. (WPCI) Update. 98th AAPA Annual Convention.

Rens, K. (2013): Sustainable Approach for Optimal Steel Sheet Pile Structure Assessment, Maintenance, and Rehabilitation. Journal of Performance of Constructed Facilities, Volume 27 Issue 2

Software tool for calculation of sustainability and environmental design variants of ground, road and water works. <https://www.dubocalc.nl/en/>

Autoren:

Dr.-Ing. Oliver Hechler
Dipl.-Ing. Ernst Weber

Dipl.-Ing. Oliver Gregor

ArcelorMittal Sheet Piling
66, Rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette
Luxembourg

ArcelorMittal Commercial Long Deutsch-
land GmbH, Spundwand, Techn. Büro
Eilper Straße 71-75
D-58091 Hagen

Tel.: +352 5313 3105
E-Mail: spundwand@arcelormittal.com

Tel.: +49 2331 3709 47
E-Mail: oliver.gregor@arcelormittal.com

Schalltechnische Untersuchungen des Baustellenlärms bei wasserbau- lichen Maßnahmen

Alexander Colloseus

1 Übersicht

Nach den Statistiken des Umweltbundesamtes fühlt sich mehr als die Hälfte der Teilnehmer einer Online-Umfrage von Baustellenlärm belästigt. Rund jeder sechste fühlt sich sogar stark oder äußerst belästigt. Die Anteile der Belästigten liegen damit beispielsweise über den Anteilen, die der Industrie- und Gewerbelärm auslöst.

Im Laufe des Lebens wird also vermutlich ein Großteil der Bevölkerung spürbaren Belästigungen durch die Geräusche während Baumaßnahmen ausgesetzt. Dennoch finden Immissionsprognosen mit der Folge eines Lärmminde-rungskonzepts für Baustellenlärm weitaus seltener statt als z. B. für Industrie- und Gewerbeanlagen. Teilweise lässt sich das aus der temporären Natur von Baumaßnahmen begründen, einen Anteil an der eher stiefmütterlichen Behandlung haben aber auch die weniger stringente rechtliche Regelung und geringe Erfahrungen in der Thematik bei den Behörden und Planern.

Nachfolgend soll deshalb zunächst für potentielle Konflikte sensibilisiert werden, die auch bei wasserbaulichen Maßnahmen hervorgerufen werden können. Zudem wird das grundlegende Verfahren zur Abarbeitung des Themas umrissen. Hierfür dient das reale Projekt des Ersatzneubaus eines Wehrs als Beispiel.

2 Rechtliche Grundlagen

Beurteilungsgrundlage für den Baustellenlärm ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz (*BImSchG*) in Verbindung mit den Regelungen der „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm - Geräusch-immissionen“ (*AVV Baulärm*).

Baustellen sind demnach im Regelfall (wenn die Maßnahme nicht unmittelbar z. B. aufgrund von Staubentwicklung oder dem Umgang mit geregelten Stoffen genehmigungsbedürftig ist) als nicht genehmigungsbedürftige Anlagen nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und 2 *BlmSchG* zu beurteilen. Hiernach sind Baustellen so zu errichten und zu betreiben, dass

„1. schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind,

2. nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden“ (*BlmSchG*).

Schädliche Umwelteinwirkungen sind nach § 3 *BlmSchG* "Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen."

Die Bewertung der Erheblichkeit der Lärmimmissionen wird dabei i. d. R. nach den Vorgaben der „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm - Geräuschimmissionen“ (*AVV Baulärm*), die von der Bundesregierung 1970 erlassen wurde, vorgenommen.

Die *AVV Baulärm* stammt damit aus einer Zeit, in der Planungen nicht in CAD vorgenommen wurden und eine IT-gestützte Prognose der Immissionen einer Baustelle noch undenkbar war. Die Regelungen waren für die Überwachung einer schon laufenden Baustelle gedacht, sodass Behörden eine Grundlage zur Beurteilung von Messwerten im laufenden Betrieb und eine Hilfestellung zum Umgang mit festgestellten Lärmkonflikten hatten.

Das Regelwerk ist zwar veraltet, bis auf weiteres aber die maßgebende Grundlage, sodass sich ein Überblick der Vorgaben lohnt.

Als Baustelle ist nach *AVV Baulärm* der Bereich definiert, „in dem Baumaschinen zur Durchführung von Bauarbeiten Verwendung finden, einschließlich der Plätze, auf denen Baumaschinen zur Herstellung von Bauteilen und zur Aufbereitung von Baumaterial für bestimmte Bauvorhaben betrieben werden“.

Die durch Baustellen hervorgerufenen Geräuschimmissionen an umgebenen Gebäuden werden nach Immissionsrichtwerten beurteilt. Dabei werden die Beurteilungszeiträume Tag (7 bis 20 Uhr) und Nacht (20 bis 7 Uhr) unterschieden. Zu beurteilen sind einzelne Tage, für die der Pegel über die genannten Zeiträume gemittelt und mit Richtwerten verglichen wird.

Die Richtwerte werden nach der AVV Baulärm anhand der Gebietstypen unterschieden. Hierbei werden allerdings nicht konkret die heute üblichen Gebietsausweisungen aus dem Baurecht wie z. B. allgemeine Wohngebiete oder Gewerbegebiete benannt, sondern die überwiegende Nutzung beschrieben (z. B. Gebiete, die überwiegend dem Wohnen dienen).

Da zum Umgang mit dem Baustellenlärm in der Praxis auch aufgrund der veralteten Grundlagen Unsicherheiten herrschen, bestehen von verschiedener Seite Handlungsempfehlungen. Nach der *Bauaufsicht Frankfurt* beispielsweise ist eine Immissionsprognose in bestimmten Fällen bereits bei der Bauantragsstellung vorzulegen, z. B. wenn lärmintensive Baumaßnahmen in oder in der Nähe von Wohngebieten absehbar sind.

3 Anwendung im Planungsprozess

3.1 Grundlagendaten

Wesentliche Grundlage für die Prognose der Immissionen durch den Baustellenlärm sind möglichst detaillierte Informationen über den voraussichtlichen Baustellenablauf.

Hierzu gehören beispielsweise Angaben zu den zum Einsatz kommenden Baustellengeräten, deren Lage bzw. Einsatzbereich und die Einsatzdauer insgesamt und bezogen auf einzelne Tage innerhalb der Bauzeit.

Um ein klares Bild über den Baustellenablauf zu erhalten, ist ein kontinuierlicher Austausch zwischen den Planern der Baumaßnahme und den Erstellern der schalltechnischen Untersuchung unerlässlich.

Zu den Grundlagendaten gehören auch Angaben zu den Schallleistungspegeln der eingesetzten Baugeräte, die dann als Emissionsansätze bei den Berechnungen verwendet werden. Hierzu gibt es verschiedene Studien, denen für eine Vielzahl typischer Baugeräte Emissionsansätze entnommen werden können. Dazu gehört z. B. ein technischer Bericht des *Hessischen Landesamts für Umwelt und –Geologie* aus dem Jahr 2004, in dem die Geräuschemissionen von Baumaschinen untersucht wurden.

Oftmals ist jedoch ein erhöhter Aufwand für die Recherche von Emissionen von Baugeräten notwendig, wenn sich in Studien keine Ansätze finden. In solchen Fällen kann ein Kontakt mit Herstellern von Baumaschinen helfen, die tlw. über technische Datenblätter mit entsprechenden Angaben verfügen. In Ausnahmefällen kommen auch Messungen bei vergleichbaren Baumaßnahmen in Frage.

Neben den Angaben zur Baustelle ist auch das Umfeld für die letztliche Bewertung entscheidend. Ist die Maßnahme außerhalb eines Siedlungszusammenhangs geplant oder grenzen Wohngebiete direkt an? Gerade bei sehr lauten Bautätigkeiten oder bei einem stark differierenden Schutzniveau in der Nachbarschaft (z. B. rein gewerblich im direkten Umfeld, Wohnen in größerer Entfernung) muss der Untersuchungsraum oft weiträumig gewählt werden. Für den gesamten Untersuchungsraum werden Katastergrundlagen, Geländemodelle und die Gebietstypen benötigt, die tlw. von verschiedenen Stellen bezogen werden müssen. Im Optimalfall liegen zumindest für die potentiell am stärksten betroffenen Gebäude auch Angaben zur Lage schutzbedürftiger Räume in den Gebäuden vor.

3.2 Schalltechnische Modellberechnungen

Die Grundlagen fließen in einem dreidimensionalen Schallausbreitungsmodell zusammen. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft den Lageplan, der die Schallquellen in Form von Flächen- und Linienschallquellen im Bereich der Einsatzorte der Baumaschinen zeigt.



Abbildung 1: Lageplan aus einer Untersuchung des Baustellenlärms beim Ersatzneubau einer Wehranlage

Das dargestellte Beispiel betrifft den Ersatzneubau einer Wehranlage am Neckar. Die Untersuchung wurde von der *Fichtner Water & Transportation GmbH* im Jahr 2018 erstellt. Zudem ist auf dem Plan die Lage einiger Immissionsorte im Umfeld der Baumaßnahme in Form von gelben Punkten zu erkennen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus einem dreidimensionalen Schallausbreitungsmodell aus demselben Projekt. Auch hierin sind wieder die Flächen- und Linienschallquellen im Bereich der Einsatzorte der Baumaschinen zu erkennen. Zudem sieht man darin die Nachbildung des Geländes und der Gebäude, die einen wesentlichen Einfluss auf die Schallausbreitung ausüben.

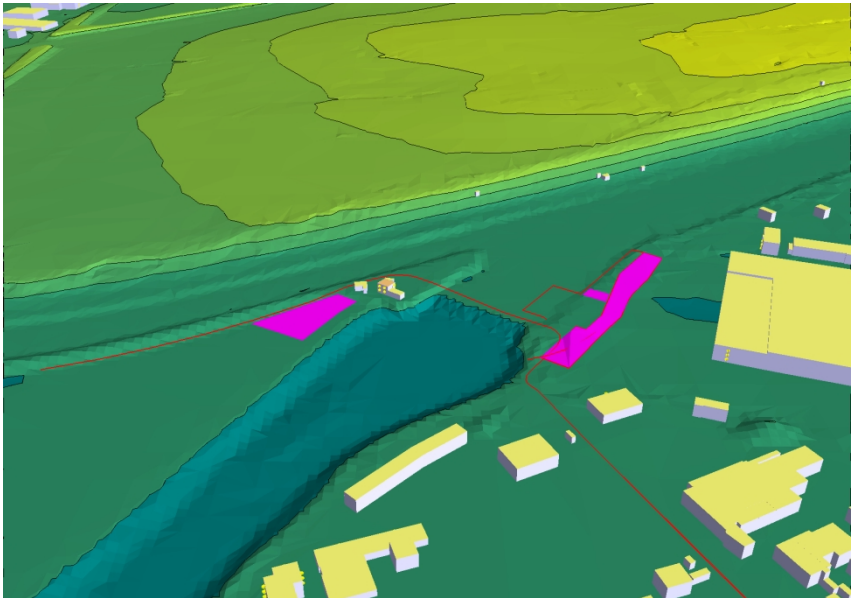


Abbildung 2: Ausschnitt aus dem 3D-Schallausbreitungsmodell zu einer Untersuchung des Baustellenlärms beim Ersatzneubau einer Wehranlage

In den Modellberechnungen erfolgt häufig eine zusammengefasste Betrachtung mehrerer typischer Bauzustände. Dadurch wird nachvollziehbar erkennbar, ob für die Einhaltung der rechtlichen Vorgaben für Baustellengeräusche voraussichtlich Lärmschutzmaßnahmen erforderlich werden.

Die Ergebnisse liefern eine Grundlage zur Identifizierung wesentlicher Schallquellen der Baustellen und somit zur Beeinflussung der Lärmsituation in der Nachbarschaft.

Da sich die Beurteilung nach AVV Baulärm auf einzelne Tage bezieht, wäre grundsätzlich eine tagesgenaue Prognose der Lärmsituation denkbar. Dies würde natürlich einen extremen Aufwand für die Prognose bedeuten. Auf der anderen Seite verlaufen Baumaßnahmen aber auch nicht so gleichförmig, dass nur eine Bauphase für die Bewertung ausreicht. In der Praxis wird in Abstimmung mit der zuständigen Behörde ein sinnvoller Umfang der Untersuchung gefunden werden müssen, der keine wesentlichen Konflikte übersieht, dabei aber einen dem Minderungsziel verhältnismäßigen Aufwand nicht überschreitet.

Die Auswahl der maßgebenden Bauphasen ist dabei nicht immer offensichtlich. In der Regel konzentrieren sich die Untersuchungen auf Bauphasen, die aufgrund der Lage und des Geräteeinsatzes die voraussichtlich höchsten Lärmbelastungen in der Nachbarschaft hervorrufen. Schwierig wird es schon, wenn besonders laute Bauphasen nur kurz andauern, leisere Bauphasen dafür aber länger. Die Auswahl kann nur im Einzelfall mit der zuständigen Behörde definiert werden.

3.3 Bewertung der Immissionen

Die mithilfe der schalltechnischen Modellberechnungen ermittelten Beurteilungspegel können dann tabellarisch für Einzelunkte oder auch flächenhaft für das gesamte Umfeld der Maßnahme ausgegeben werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Isophonenplan aus dem Beispielprojekt, in dem die ermittelten Beurteilungspegel in 5-dB(A)-Schritten flächenhaft dargestellt werden.

Deutlich im Plan zu erkennen ist die abschirmende Wirkung durch Gebäude und die damit einhergehende Abnahme der Beurteilungspegel in dahinterliegenden Bereichen sowie die freie Schallausbreitung in unbebauten Bereichen.

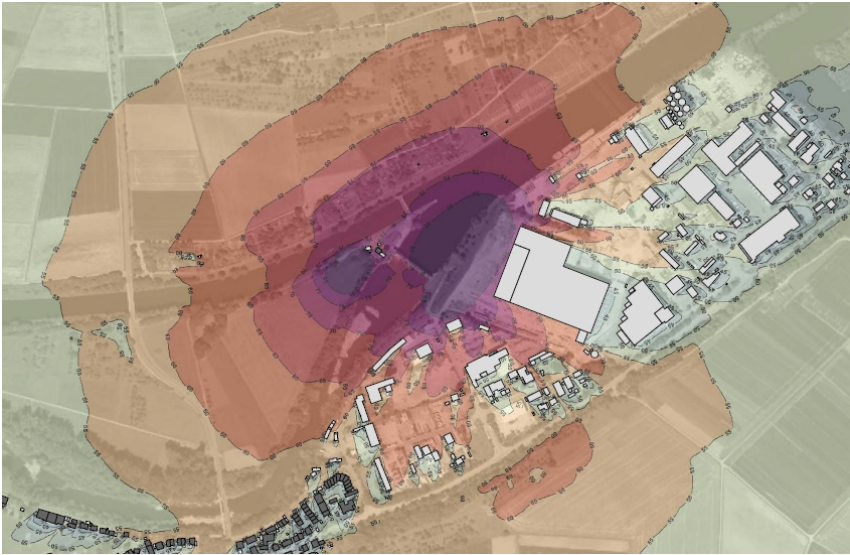


Abbildung 3: Isophonenplan aus einer Untersuchung des Baustellenlärms beim Ersatzneubau einer Wehranlage

Die Ergebnisse werden anhand der Immissionsrichtwerte der AVV Baulärm bewertet. Bei Überschreitungen der Richtwerte sind grundsätzlich Lärmschutzmaßnahmen vorzusehen, die zu einer Einhaltung der Richtwerte an den betroffenen Immissionsorten führen.

Allerdings ist hierbei auf die oben genannten Regelungen des BImSchG hinzuweisen, die bei unvermeidbaren schädlichen Umwelteinwirkungen ein Minimierungsgebot vorsehen. Eine Überschreitung, die mit verhältnismäßigen Mitteln nicht verhindert werden kann, ist somit nicht von vornherein ausgeschlossen. Das gilt insbesondere, wenn die Überschreitungen beispielsweise nur durch den kurzzeitigen Einsatz bestimmter Geräte hervorgerufen werden.

4 Maßnahmenkonzept

Die Wirkung vorgesehener Lärmschutzmaßnahmen kann mit dem schalltechnischen Modell überprüft werden. So kann prognostiziert werden, ob eine angestrebte Maßnahme den gewünschten Lärmschutz erbringt.

Die Auswahl denkbarer Lärmschutzmaßnahmen ist unbegrenzt und sehr vom Einzelfall abhängig. Die Optionen können hier nur angerissen werden. Wesentliche Grundlage zur Identifizierung geeigneter Maßnahmen sind die Detailergebnisse der Modellberechnungen, die nicht nur den Gesamtpegel am Immissionsort ausgeben können, sondern auch die Anteile einzelner Schallquellen hieran. Somit können die für eine Überschreitung entscheidenden Quellen identifiziert und für diese mögliche Minderungsmaßnahmen geprüft werden.

Zu den typischen Lärmschutzmaßnahmen gehören z. B. die Auswahl leiserer Bauverfahren, der Einsatz geräuscharmer Baumaschinen, (mobile) Lärmschutzwände, Einhausungen einzelner stationärer Geräte oder ganzer Baustellenbereiche, die Beschränkung der Betriebszeiten besonders lauter Baumaschinen.

Oftmals wird der notwendige Lärmschutz erst durch eine Kombination mehrerer Maßnahmen erzielt. Mithilfe des schalltechnischen Modells kann die Wirkung verschiedener Maßnahmenkombinationen geprüft werden.

Neben den aufgeführten möglichen Vorkehrungen zur Minderung der Lärmbelastung der Nachbarschaft ist eine frühzeitige Information der Anwohner zu empfehlen.

5 Besonderheiten

Bei Untersuchungen des Baustellenlärms treten Besonderheiten auf, die in dieser Form beispielsweise bei schalltechnischen Untersuchungen von dauerhaften Anlagen wie Gewerbebetrieben nicht vorzufinden sind.

Dazu gehört z. B. die Tatsache, dass Baustellen sich über die Bauzeit immer wieder verändern, was zu einer Vielzahl von unterschiedlichen Konstellationen der Schallquellen zu den Immissionsorten führen kann. Dies führt zu mehr Aufwand bei der Identifizierung der aus schalltechnischer Sicht maßgebenden Fälle.

Außerdem ist bei der Bewertung der Immissionen durch den Baustellenlärm ein Abwägungsspielraum gegeben. Nicht jede verbleibende Überschreitung der Immissionsrichtwerte der AVV Baulärm ist als unzumutbar einzustufen und ggf. mit weiteren Maßnahmen bis zu einer Einhaltung zu mindern.

Hierbei ist vor allem die Einsatzdauer besonders lauter Baugeräte mit der Verhältnismäßigkeit des notwendigen Aufwands von Lärmschutzmaßnahmen abzuwägen.

Kritisch ist in vielen Fällen auch die Vereinbarkeit der für den Immissionschutz erforderlichen Maßnahmen mit den betrieblichen Erfordernissen der Baustelle, die sich zudem im Verlauf ändern. Die Aufstellung mobiler Wände kann für manche Baustellen eine geeignete Lösung sein, in anderen Fällen wäre vielleicht ein ständiges Versetzen nötig, sodass kein sinnvoller Einsatz möglich ist. Ein typischer Zielkonflikt besteht auch immer dann, wenn die Maßnahme zwar zu einer Minderung der für den einzelnen Tag auftretenden Pegel führt, dafür aber die Gesamtdauer der Maßnahme erhöht. Welcher Aspekt im Einzelfall überwiegt ist nicht pauschal zu beantworten.

6 Fazit

Ein überwiegender Teil der Bevölkerung fühlt sich von Baustellenlärm betroffen. Fast jeder hat also auch schon unfreiwillig etwas von Baustellen gehört. Dennoch stellen Immissionsprognosen noch nicht den Regelfall dar.

Wie beschrieben bestehen jedoch rechtliche Anforderungen zum Baustellenlärm. Gerade bei lang andauernden Baumaßnahmen mit lärmintensiven Bautätigkeiten und schutzbedürftigen Nutzungen im Umfeld ist die teilweise noch vorhandene Zurückhaltung in der Thematik potentiell kritisch.

Im schlimmsten Fall droht eine Stilllegung des Baustellenbetriebs, wenn eine nachgewiesene Überschreitung besteht und zumindest kurzfristig keine Minderungsmaßnahmen ergriffen werden können. Es versteht sich von selbst, dass sich dies auf die Dauer und Kosten der Maßnahme nicht vorteilhaft auswirken würde.

Um den rechtlichen Anforderungen gerecht zu werden, die Anwohner einer Baumaßnahme angemessen zu schützen und auch einen reibungslosen Bauablauf zu gewährleisten, empfiehlt sich eine frühzeitige Auseinandersetzung mit dem Thema Baustellenlärm.

Zudem zeigt die Praxis, dass durch eine Einbindung und Information der betroffenen Nachbarschaft auch eine höhere Akzeptanz der Baumaßnahme erreicht werden kann.

7 Literatur

- AVV Baulärm: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm, Beilage zum BAnz Nr. 160, August 1970
- Bauaufsicht Frankfurt: unter <https://www.bauaufsicht-frankfurt.de/service/baulaerm>, Januar 2020
- BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1839) geändert worden ist.
- Fichtner Water & Transportation GmbH (2018): Schalltechnische Untersuchung des Ersatzneubaus einer Wehranlage in Beihingen im Auftrag des Amts für Neckarausbau Heidelberg, Mai 2018
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2004): Technischer Bericht zur Untersuchung der Geräuschemissionen von Baumaschinen, Schriftenreihe „Umwelt und Geologie – Lärmschutz in Hessen“, Heft 2, 2004

Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Alexander Colloseus

Dipl.-Ing. Attila Villanyi

FICHTNER
Water & Transportation GmbH
Leiter Immissionsschutz Freiburg
Linnéstr. 5
79110 Freiburg

FICHTNER
Water & Transportation GmbH
Immissionsschutz
Linnéstr. 5
79110 Freiburg

Tel.: +49-761/88505-37
Fax: +49-761/88505-22
E-Mail: alexander.colloseus@fwt.fichtner.de

Tel.: +49-761/88505-41
Fax: +49-761/88505-22
E-Mail: attila.villanyi@fwt.fichtner.de

Bisher erschienene Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

- | | | |
|-------------------------------|------|---|
| Heft 1
(vergriffen) | 1989 | Klaus Römisch
Empfehlung zur Bemessung von Hafeneinfahrten
Eberhard Lattermann
Bemessungsgrundlagen für Dichtungen und
Deckwerke im Wasserbau |
| Heft 2
(vergriffen) | 1990 | Frank Krüger
Schubspannungsverteilungen in offenen, geradlinigen
Trapez- und Rechteckgerinnen
Helmut Martin, Reinhard Pohl
Überflutungssicherheit von Talsperren |
| Heft 3
(vergriffen) | 1990 | Reinhard Pohl
Die Entwicklung der wasserbaulichen Lehre und
Forschung an der Technischen Universität Dresden
Reinhard Pohl
Die Berechnung der auf- und überlaufvermindernden
Wirkungen von Wellenumlenkern im Staudambau |
| Heft 4
(vergriffen) | 1991 | Ellen Haufe
Hydromechanische Untersuchungen von Mischungs-,
Flockungs- und Sedimentationsprozessen in der
Trinkwasseraufbereitung |
| Heft 5 | 1994 | Wasserbaukolloquium 1993
Die Elbe – Wasserstraße und Auen |
| Heft 6
(vergriffen) | 1995 | Wasserbaukolloquium 1994
Wasserkraft und Umwelt
ISBN 3-86005-154-7 |

- | | | |
|--------------------------------|------|---|
| Heft 7 | 1995 | Wasserbaukolloquium 1995
Hydromechanische Beiträge zum Betrieb von
Kanalnetzen
ISBN 3-86005-155-5 |
| Heft 8 | 1996 | Detlef Aigner
Hydrodynamik in Anlagen zur Wasserbehandlung
ISBN 3-86005-164-4 |
| Heft 9
(vergriffen) | 1996 | Wasserbaukolloquium 1996
Wellen: Prognosen - Wirkungen – Befestigungen
ISBN 3-86005-165-2 |
| Heft 10 | 1997 | Wasserbaukolloquium 1997
Sanierung und Modernisierung von
Wasserbauwerken, aktuelle Beispiele aus Deutschland,
Polen, der Slowakei und Tschechien
ISBN 3-86005-185-7 |
| Heft 11
(vergriffen) | 1997 | Reinhard Pohl
Überflutungssicherheit von Talsperren
ISBN 3-86005-186-5 |
| Heft 12
(vergriffen) | 1998 | Reinhard Pohl
Die Geschichte des Institutes für Wasserbau an der
Technischen Universität Dresden
ISBN 3-86005-187-3 |
| Heft 13 | 1998 | Wasserbaukolloquium 1998
Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau,
Entwicklung – Perspektiven
ISBN 3-86005-201-2 |
| Heft 14 | 1998 | Uwe Müller
Deformationsverhalten und Belastungsgrenzen des
Asphaltbetons unter den Bedingungen von
Staudammkerndichtungen
ISBN 3-86005-213-6 |

- Heft 15** 1999 **Wasserbaukolloquium 1999**
Betrieb, Instandsetzung und Modernisierung von
Wasserbauwerken
ISBN 3-86005-223-3
- Heft 16** 1999 **Dirk Carstensen**
Beanspruchungsgrößen in Fließgewässern mit
geschwungener Linienführung
ISBN 3-86005-236-5
- Heft 17** 1999 **Ehrenkolloquium Prof. Martin**
(vergriffen) anlässlich des 60. Geburtstages von
Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Martin
ISBN 3-86005-237-3
- Heft 18** 2000 **Wasserbaukolloquium 2000**
Belastung, Stabilisierung und Befestigung von Sohlen
und Böschungen wasserbaulicher Anlagen
ISBN 3-86005-243-8
- Heft 19** 2001 **Seleshi B. Awulachew**
Investigation of Water Resources Aimed at Multi-
Objective Development with Respect to Limited Data
Situation: The Case of Abaya-Chamo Basin, Ethiopia
ISBN 3-86005-277-2
- Heft 20** 2001 **Stefan Dornack**
Überströmbare Dämme Beitrag zur Bemessung von
Deckwerken aus Bruchsteinen
ISBN 3-86005-283-7
- Heft 21** 2002 **Wasserbaukolloquium 2002**
Innovationen in der Abwasserableitung und
Abwassersteuerung
ISBN 3-86005-297-7

- Heft 22** 2002 **Zelalem Hailu G. Chirstos**
Optimisation of Small Hydropower Sites for Rural
Electrification
ISBN 3-86005-304-3
- Heft 23** 2002 **Ehrenkolloquium Prof. Wagner**
Zur Emeritierung von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner
ISBN 3-86005-307-8
- Heft 24** 2003 **Wasserbaukolloquium 2003**
Gewässer in der Stadt.
ISBN 3-86005-358-2
- Heft 25** 2003 **Toufik Tetah**
Numerische Simulation des dynamischen Verhaltens
von Caisson-Wellenbrecher-Gründungen unter
Einwirkung brechender Wellen
ISBN 3-86005-363-9
- Heft 26** 2003 **Ehrenkolloquium Prof. Horlacher**
Zum 60. Geburtstag von
Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-B. Horlacher
ISBN 3-86005-376-0
- Heft 27** 2004 **Wasserbaukolloquium 2004**
(vergriffen) Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von
Fließgewässern und Stauanlagen
ISBN 3-86005-414-7
- Heft 28** 2004 **Reinhard Pohl**
Historische Hochwasser aus dem Erzgebirge
ISBN 3-86005-428-7
- Heft 29** 2005 **Wasserbaukolloquium 2005**
(vergriffen) Stauanlagen am Beginn des 21. Jahrhunderts
ISBN 3-86005-461-9

- Heft 30** 2005 **Nigussie Teklie Girma**
Investigation on Sediment Transport Characteristics
and Impacts of Human Activities on Morphological
Processes of Ethiopian Rivers: Case Study of Kulfo
River, Southern Ethiopia
ISBN 3-86005-483-X
- Heft 31** 2006 **Matthias Standfuß**
Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitunge-
naus PE-HD
ISBN 3-86005-495 - 3
- Heft 32** 2006 **Wasserbaukolloquium 2006**
Strömungssimulation im Wasserbau
ISBN 3-86005-473-2
- Heft 33** 2006 **Antje Bornschein**
Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Soh-
le unter besonderer Berücksichtigung der
Wellenfront
ISBN 3-86005-523-2
- Heft 34** 2007 **Torsten Frank**
Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten
Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals
ISBN 978-3-86780-019-8
- Heft 35** 2007 **Wasserbaukolloquium 2007**
Fünf Jahre nach der Flut
ISBN 987-3-86005-571-7
- Heft 36** 2008 **Aktuelle Forschungen 1993 – 2008**
Zum 65. Geburtstag von Herrn Prof. Horlacher
ISBN 978-3-86780-083-9
- Heft 37** 2009 **Dirk Carstensen**
Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen,
Bemessungsgrößen
ISBN 978-3-86780-099-0

- Heft 38** 2009 **Reinhard Pohl, Antje Bornschein,
(vergriffen) Robert Dittmann, Stefano Gilli**
Mehrzieloptimierung der Steuerung von Talsperren
zur Minimierung von Hochwasserschäden
im Unterwasser
ISBN 978-3-86780-100-3
- Heft 39** 2009 **Wasserbaukolloquium 2009**
(vergriffen) Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels,
angepasste Strategien – neue Technologien
ISBN 978-3-86780-101-0
- Heft 40** 2010 **Wasserbaukolloquium 2010**
(vergriffen) Wasserbau und Umwelt – Anforderungen, Methoden,
Lösungen
ISBN 978-3-86780-101-0
- Heft 41** 2010 **Ralf Tackmann**
Erosion 2008 – Ein numerisches Modell zur Prognose
des Bodenaustrages von kohäsiven Böden unter
Berücksichtigung der Rillenerosion
ISBN 978-3-86780-158-4
- Heft 42** 2010 **Ulf Helbig**
Tragverhalten und Berechnung von mehrschichtigen
Verbundrohren
ISBN 978-3-86780-159-1
- Heft 43** 2010 **Stefano Gilli**
Die Wirkung von Flussaufweitungen auf
Hochwasserwellen – Parameterstudie einer
Deichrückverlegung im Flussmittellauf
ISBN 978-3-86780-160-7
- Heft 44** 2010 **Negede Abate Kassa**
Probabilistic Safety Analysis of Dam – Methods and
Applications
ISBN 978-3-86780-161-4

- Heft 45** 2011 **Wasserbaukolloquium 2011**
(vergriffen) Wasserkraft –
Mehr Wirkungsgrad + Mehr Ökologie = Mehr Zukunft
ISBN 978-3-86780-198-0
- Heft 46** 2011 **Torsten Heyer**
Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem
Verfahren der logistischen Regression
ISBN 978-3-86780-197-3
- Heft 47** 2011 **Wasserbaukolloquium 2012**
Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben
ISBN 978-3-86780-261-1
- Heft 48** 2013 **Wasserbaukolloquium 2013**
Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz
–Bauwerke, Anforderungen, Modelle
ISBN 978-3-86780-318-2
- Heft 49** 2013 **Vinzent Sturm**
Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion mit freier
Oberfläche am Beispiel des Schlauchwehres unter
Anwendung von Ansys/CFX
ISBN 978-3-86780-348-9
- Heft 50** 2014 **Wasserbaukolloquium 2014**
Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und
Wasserwirtschaft
ISBN 978-3-86780-349-6
- Heft 51** 2014 **Holger Haufe**
Zwischenauslässe an Talsperren
- Beispiele, Bemessung, Konstruktion, Nachrüstung
ISBN 978-3-86780-393-9
- Heft 52** 2014 **Pohl/Bornschein u.a.**
Effect of very oblique waves on wave run-up and wave
overtopping
ISBN 978-3-86780-392-2

- Heft 53** 2015 **Wasserbaukolloquium 2015**
Messen und Überwachen im Wasserbau und am
Gewässer
ISBN 978-3-86780-420-2
- Heft 54** 2015 **Mohammed Abdallah**
Developing a Multi-purpose Reservoir operating Model
with Uncertain Conditions: a Case of Eastern Nile
Reservoirs – Sudan
ISBN 978-3-86780-431-8
- Heft 55** 2015 **Paolo Dapoz**
Reinigung von Abwasserkanälen mittels
Niederdruckspülverfahren
ISBN 978-3-86780-432-5
- Heft 56** 2015 **JuWi-Treffen**
17. JuWi-Treffen: Fachbeiträge zur Tagung vom
26.-28. August 2015
ISBN 978-3-86780-448-6
- Heft 57** 2016 **Wasserbaukolloquium 2016**
Gewässerentwicklung &
Hochwasserrisikomanagement
ISBN 978-3-86780-475-2
- Heft 58** 2017 **Wasserbaukolloquium 2017**
Bemessung im Wasserbau – Klimaanpassung,
Untersuchung, Regeln, Planung, Ausführung
ISBN 978-3-86780-509-4
- Heft 59** 2017 **Roberto Tatis Muvdi**
A contribution to the hydro morphological assessment
of running waters based on habitat dynamics.
ISBN 978-3-86780-512-4

- Heft 60** 2018 **Wasserbaukolloquium 2018**
Wasserbauwerke im Bestand – Sanierung, Umbau,
Ersatzneubau und Rückbau
ISBN 978-3-86780-556-8
- Heft 61** 2018 **Lydia Schulze**
Development of an Application-Oriented Approach for
Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering
ISBN 978-3-86780-571-1
- Heft 62** 2019 **Wasserbaukolloquium 2019**
Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre
Lösungen
ISBN 978-3-86780-577-3
- Heft 63** 2020 **Wasserbaukolloquium 2020**
Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel
ISBN 978-3-86780-627-5

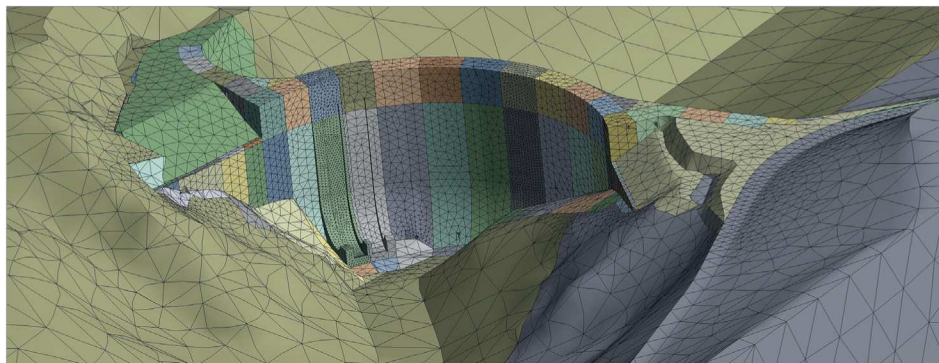
Die Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen können bezogen werden über:

Technische Universität Dresden
Bereich Bau und Umwelt
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Telefon: +49 351 463 34397
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: tagungsband@wasserbaukolloquium.de

Ein großer Teil unserer Hefte ist digitalisiert und über das Fachrepositorium
HENRY der Bundesanstalt für Wasserbau einzusehen.

<https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/99399>



INGENIEURKOMPETENZ. MADE IN GERMANY.

Geschäftsfelder

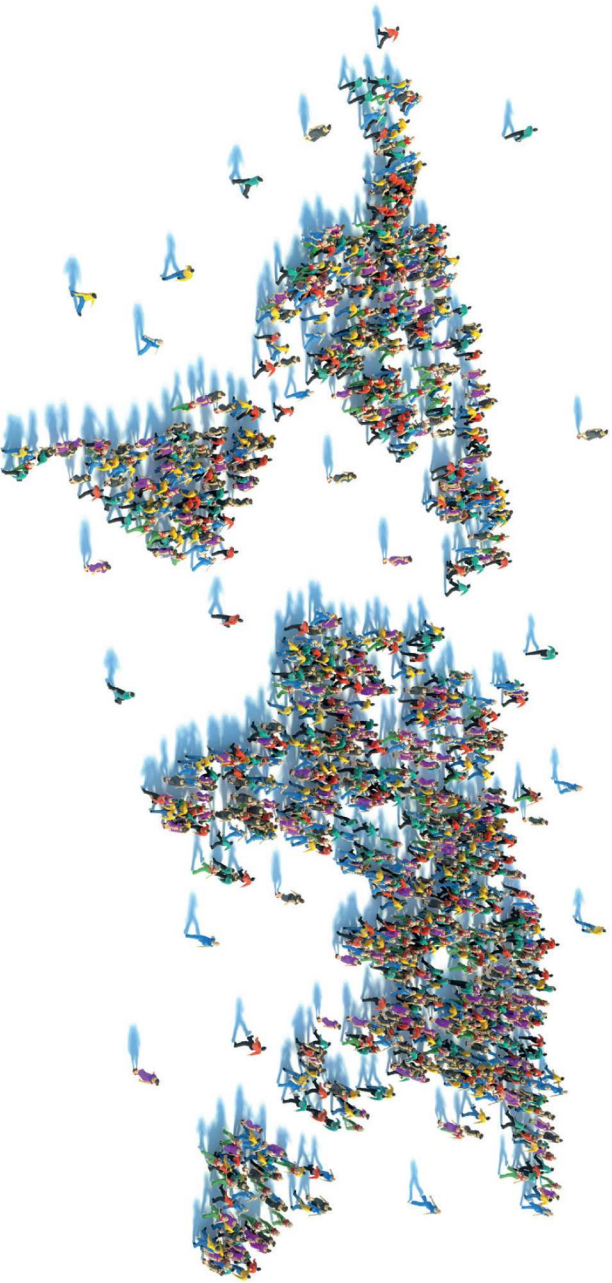
- ◆ Hochwasser- und Küstenschutz
- ◆ Stauanlagen
- ◆ Wasserkraftanlagen
- ◆ Verkehrswasser- und Hafenbau

- ◆ Maschinen- und Stahlwasserbau
- ◆ Fördertechnik und Kranbau
- ◆ Brückenbau
- ◆ Infrastruktur
- ◆ Umwelt

Tractebel Hydroprojekt GmbH · Rießnerstraße 18 · 99427 Weimar · hydroprojekt-DE@tractebel.engie.com · www.hydroprojekt.de
Bad Vilbel · Dresden · Freiburg i. Br. · Hamburg · Magdeburg · München · Weimar

Das Absolventennetzwerk der TU Dresden

Informationen // Kontakte // Veranstaltungen // Absolventenmagazin // Stellenangebote



© Bildagentur PantherMedia / StockerNumber2



Interessiert? Werden Sie Mitglied:
tu-dresden.de/absolventennetzwerk



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Ich bin
Absolvent.

ISSN 0949-5061 • ISBN 978-3-86780-627-5